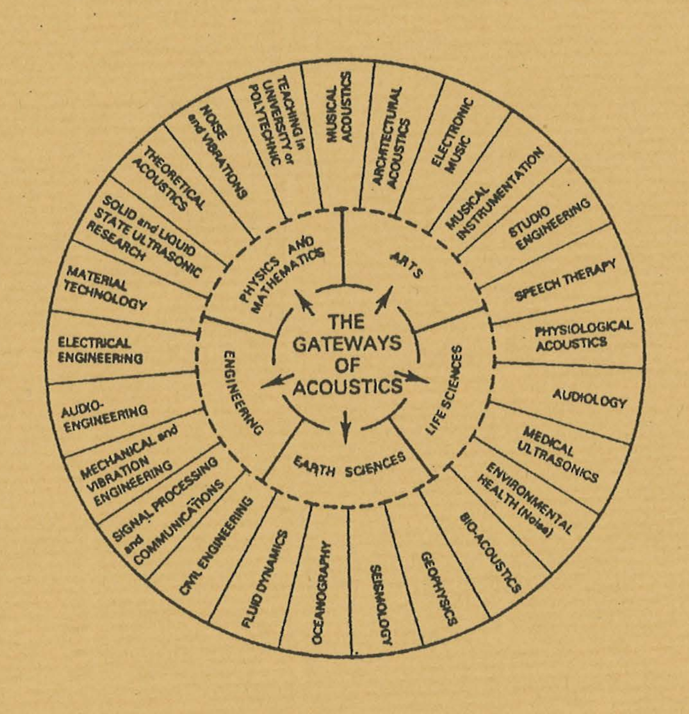
APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (I)

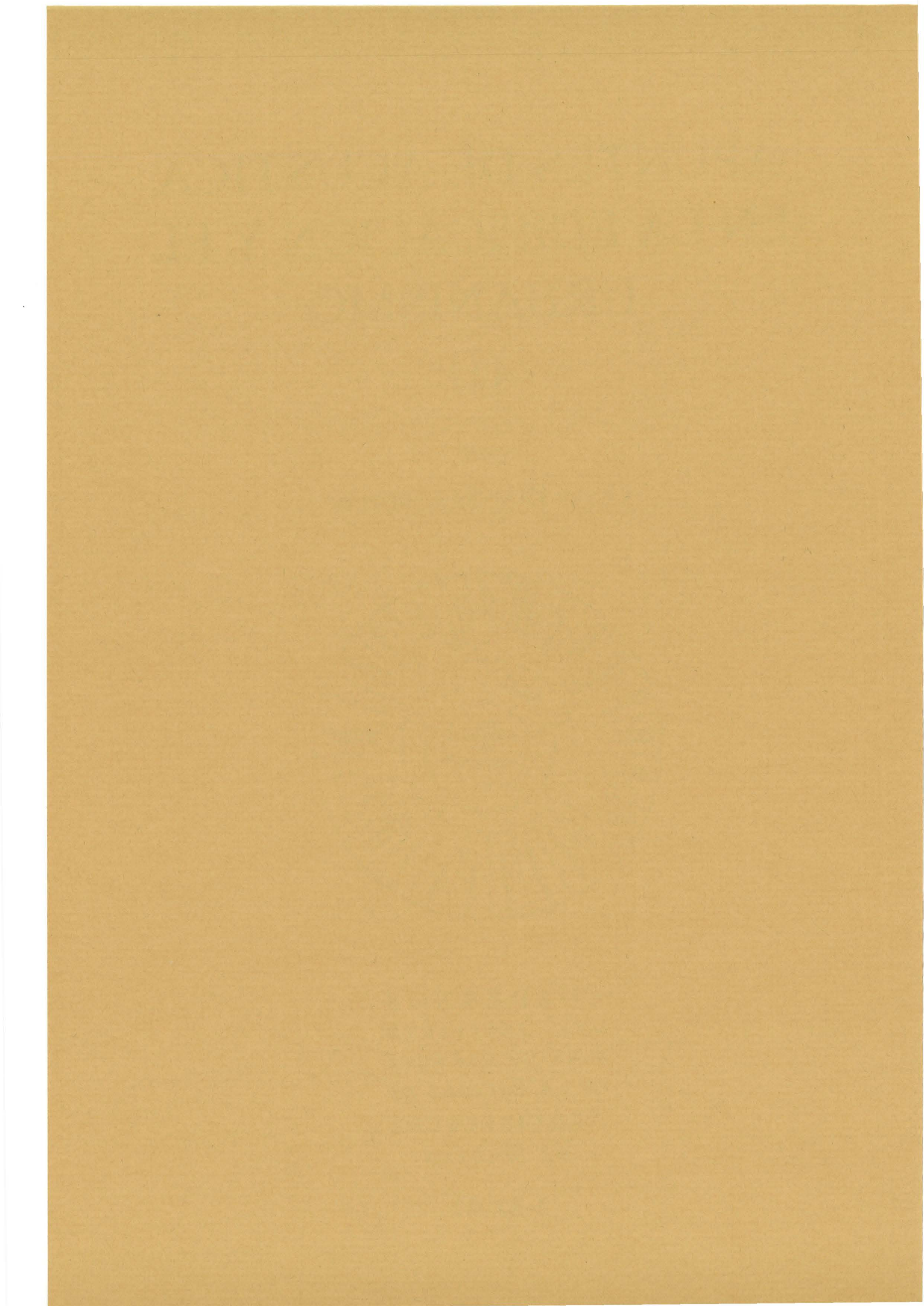
por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-02



APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (I)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-01

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

NUEVA NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
01 Ordinal de cuaderno (del autor)

Apuntes de acústica en la edificación y el urbanismo (I)

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Gestión y portada: Laura Bejerano Iglesias
CUADERNO 122.02 / 2 -51-01
ISBN: 84-9728-021-0 (obra completa)
ISBN: 84-9728-084-9 (Apuntes I. 2ª edicion)
Depósito Legal: M-40487-2003

ÍNDICE

1 FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA FÍSICA

1.1 Introducción
1.2 La ecuación de ondas
1.3 Ondas elásticas en los fluidos
1.4 Ondas elásticas planas en un fluido
1.5 Ondas esféricas en un fluido
1.6 Ondas cilíndricas en un fluido
1.7 Ondas en los sólidos
  1.7.1 Ondas en medios ilimitados
  1.7.2 Ondas en sólidos finitos
1.8 Potencia acústica
1.9 Fenómenos de propagación en un movimiento ondulatorio
1.10 Reflexión y refracción
1.11 Superposición e interferencia
1.12 Difracción
1.13 Coeficientes de reflexión, absorción y transmisión
1.14 Propiedades físicas de algunos materiales

2 LA MEDIDA DEL SONIDO

2.1 Introducción
2.2 Niveles y decibelios
2.3 Nivel de intensidad acústica
2.4 Nivel de presión acústica
2.5 Nivel de potencia acústica
2.6 Composición de niveles acústicos
2.7 Las medidas acústicas en ambientes ruidosos. La corrección por ruido de fondo
2.8 Nivel medio de presión acústica
2.9 Relaciones entre los niveles acústicos de presión, intensidad y potencia
2.10 Análisis espectral del sonido. Ruido blanco y ruido rosa
2.11 Redes de ponderación
  2.11.1 Ponderaciones de frecuencia
  2.11.2 Ponderaciones temporales
2.12 Índices de valoración del ruido
2.13 Indicadores de ruido propuestos en la directiva 2002/49/ce del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.
2.14 Tipos de ruidos. Ejemplos

1.- FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA FÍSICA

1.1.- INTRODUCCIÓN

La Acústica es la Ciencia que trata de los métodos de producción, transmisión y recepción del sonido, tiene un ámbito de aplicación muy amplio y está muy relacionada con diversas especialidades de la ciencia y la ingeniería. En la figura 1.1 se muestra el ámbito de aplicación y las ramificaciones de la Acústica (Lindsay, R.B.,1964, JASA, 36, 2242).

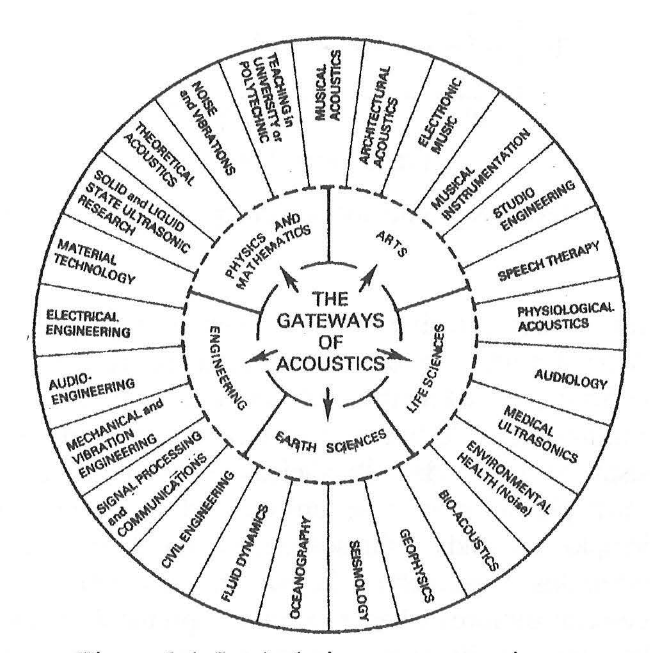


Figura 1.1: La Acústica y sus conexiones.

Se denomina sonido a la sensación experimentada cuando llegan a nuestro oído las ondas elásticas, producidas por movimientos vibratorios de determinadas características. El sonido se produce por vibraciones de los cuerpos, éstas se transmiten por un medio material en forma de movimiento ondulatorio, que produce vibraciones en la membrana del tímpano, éstas excitan las terminales del nervio acústico que transportan al cerebro los impulsos neuronales que producen la sensación sonora. Las ondas sonoras que se propagan en los gases son longitudinales.

La velocidad de propagación de las ondas mecánicas en un medio elástico, depende de las características del mismo, siguiendo en general una expresión de la forma:

$$c = \sqrt{\frac{\text{Propiedad elástica}}{\text{Propiedad inercial}}}$$

La velocidad de propagación del sonido en el rango audible es prácticamente independiente de la frecuencia, es decir el medio en el que se propaga no es dispersivo. Las ondas sonoras producen sensaciones en el sentido del oído cuando la amplitud de la presión acústica supera unos valores umbrales y el rango de frecuencias audibles está entre 20 Hz y 20 kHz. Los sonidos se pueden generar de muy diferentes maneras: cuerdas vocales, instrumentos musicales, altavoces, etc.

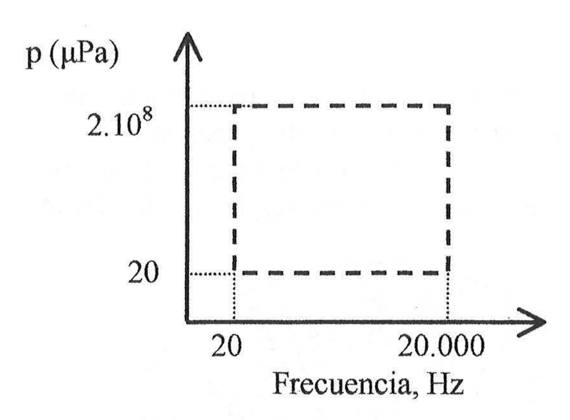


Figura 1.2: Intervalos promedios de percepción del oído humano

Al sonido no deseado, o desagradable, se le denomina *ruido*, la sensación de ruido generalmente está asociada a una variación aleatoria de la presión acústica, por ejemplo circulación de automóviles, el sobrevuelo de un avión. Fuera del rango audible se encuentran las ondas infrasónicas, de frecuencias más bajas a las del espectro audible, por ejemplo, las ondas sísmicas. Las ondas ultrasónicas tienen frecuencias más altas que las audibles, los materiales piezoeléctricos se utilizan habitualmente para generar ondas ultrasónicas. Por ejemplo las ondas ultrasónicas sirven para orientarse a delfines y submarinos. Los ultrasonidos se usan en medicina para estudiar el funcionamiento de las válvulas cardiacas, detectar tumores y hacer exámenes prenatales; son más sensibles que los rayos X para distinguir los diversos tipos de tejidos y no ofrecen el peligro de la radiación de estos rayos.

INFRASONIDOS | SONIDO | ULTRASONIDOS
→ 20Hz ↔ 20kHz →

El rango de frecuencias audibles en los animales varía ampliamente, por ejemplo una salamandra puede oír únicamente sonidos entre 50 Hz y 220 Hz, la araña común entre 20 Hz y 45 kHz, los murciélagos entre 30 Hz y 80 kHz.

Desde el punto de vista físico, hay dos aspectos de las ondas sonoras claramente diferenciados según quien sea el receptor. Si éste es un aparato de medida, existen unas leyes físicas bien determinadas que relacionan entre sí la emisión, propagación y recepción con unas determinadas magnitudes físicas, por ejemplo, la presión y la intensidad sonora. Si el receptor es el oído humano, la medida del sonido ya no es objetiva, pues no medimos magnitudes físicas, sino que percibimos sensaciones auditivas.

1.2.- LA ECUACIÓN DE ONDAS

El movimiento ondulatorio consiste en la propagación de una perturbación de la condición de equilibrio de una magnitud física, de un punto a otro del espacio en un intervalo de tiempo, sin transporte neto de materia. Se propaga la perturbación pero no el medio material. Se propaga energía y cantidad de movimiento. La magnitud física perturbada puede ser escalar, ondas escalares o vectorial, ondas vectoriales. Las ondas

pueden ser longitudinales, si el medio se desplaza en la dirección del movimiento, por ejemplo las ondas sonoras; transversales, el medio se desplaza en una dirección perpendicular a la del movimiento de la onda, por ejemplo las ondas en una cuerda; o una combinación de ellas, como por ejemplo las ondas de flexión. Se pretende conocer en cada instante de tiempo, la perturbación que afecta a cada punto del medio por el que se propaga. La ecuación que describe la propagación de la perturbación se llama ecuación de ondas.

La forma más general de la ecuación diferencial de onda unidimensional no amortiguada o ecuación del movimiento ondulatorio es

$$\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} \tag{1.1}$$

Donde: x es la posición; t el tiempo; c la velocidad de fase de la onda, la velocidad con la cual se mueve el perfil. La magnitud $\psi(x,t)$ es la función de onda unidimensional, describe la onda y puede representar muy diversas magnitudes físicas, tales como la presión de un gas, un campo eléctrico, la deformación de un sólido, etc.

$\psi(x,t) = f(x-ct)$ describe de forma general una función de onda que tiene un determinado perfil que no cambia su forma y que se mueve en el sentido positivo del eje X con una velocidad de fase c. Si la onda viajara en el sentido negativo, la función de onda sería $\psi(x,t) = f(x+ct)$, $c > 0$.

La ecuación general de onda en tres dimensiones en coordenadas rectangulares es

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}\right) \tag{1.2}$$

ONDAS ARMÓNICAS

La forma de onda más sencilla es aquella cuyo perfil es una curva tipo seno o coseno. Las ondas armónicas simples tienen un significado especial, pues pueden combinarse para producir ondas de cualquier forma, dependiendo de sus amplitudes y frecuencias.

Expresiones habituales de la función de onda armónica son las siguientes:

$$\psi(x,t) = A.sen(k(x-ct)+\varepsilon) = A.sen(kx-\omega t+\varepsilon) = A.sen(2\pi(\frac{x}{\lambda}-\frac{t}{T})+\varepsilon) \tag{1.3}$$

Esta función es doblemente periódica, tanto en el espacio como en el tiempo, se comprueba manteniendo constante x o t.

A es la amplitud de la onda, en m. Al argumento completo de la función seno se le llama *fase* φ de la onda. La fase de la perturbación es una función de la posición y del tiempo.

$$\varphi\,(x,t) = (kx - \omega t + \varepsilon) \tag{1.4}$$

ε es la *fase inicial*. La fase inicial es la contribución constante a la fase que produce el generador de la onda y es independiente de la distancia que ha viajado la onda o el instante de tiempo.

El periodo espacial se llama longitud de onda, se escribe λ y su unidad en el Sistema Internacional es el metro. Es el número de unidades de longitud por onda. Una variación en el valor de x en la cantidad λ, deja invariable ψ.

Se denomina a k *número de onda*, se define: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, m^{-1}, representa el número de longitudes de onda en la distancia 2π.

El *período temporal* T, es el intervalo de tiempo, en segundos, que tarda una onda en superar la posición de un observador estacionario. Si lo escribimos en función de la *frecuencia temporal* $f = 1/T$, en Hz o ciclos/s, representa el número de ondas por unidad de tiempo

Se denomina *frecuencia temporal angular* o *pulsación* a $\omega = \frac{2\pi}{T}$ rad/s

La *expresión fundamental* que relaciona la velocidad de propagación de la perturbación, velocidad de fase de la onda, con las dos periodicidades es

$$c = \lambda . f = \frac{\omega}{k} \text{ m/s} \qquad (1.5)$$

Las ondas descritas son de longitud infinita, es decir, para cualquier valor fijo de t, x varía de $-\infty$ a $+\infty$. Cada onda tiene una sola frecuencia y se dice que es *monocromática o monoenergética.* Las ondas en la práctica no son nunca monocromáticas. Las perturbaciones ondulatorias tienen una duración finita y son anarmónicas, sin embargo el Teorema de Fourier nos prueba que cualquier forma de onda puede descomponerse en una combinación de ondas armónicas.

La longitud de onda, período, frecuencia, frecuencia angular y número de onda describen aspectos de la naturaleza repetitiva de una onda armónica en el espacio y en el tiempo.

Es importante distinguir entre la velocidad de fase de la onda c y la velocidad de las partículas del medio v. En el caso de ondas armónicas unidimensionales $v_x = \frac{\partial \psi}{\partial t}$. La máxima velocidad de las partículas del medio puede ser menor, igual o mayor que la velocidad de fase

Frente de onda o superficie de onda de una onda progresiva, es una superficie continua, lugar geométrico de todos los puntos del espacio, que en cada instante de tiempo tienen la misma fase. Son particularmente interesantes las ondas planas, esféricas y cilíndricas.

De todas las ondas tridimensionales, únicamente las ondas planas, armónicas o no, no cambian su perfil al desplazarse en el espacio. Cualquier onda tridimensional puede escribirse como una combinación de ondas planas.

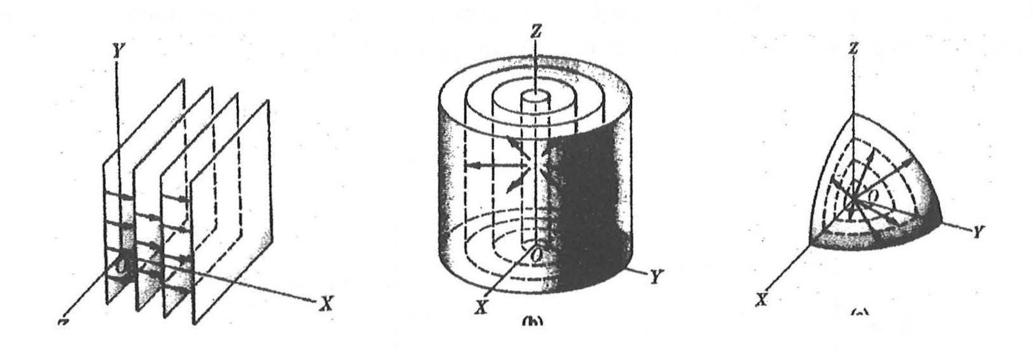


Figura 1.3: Frentes de onda planos, cilíndricos y esféricos.

1. 3.- ONDAS ELASTICAS EN LOS FLUIDOS

La deducción de la ecuación general de la onda acústica linealizada para cualquier tipo de onda no disipativa, progresiva y tridimensional se basa en las siguientes hipótesis: Se considera que el medio es continuo, homogéneo, completamente elástico y a pequeñas amplitudes de desplazamiento y velocidades de las partículas del medio corresponden pequeños cambios de presión y densidad. El proceso es adiabático. No se consideran los fenómenos disipativos originados por la viscosidad y conducción de calor.

Experimentalmente se ha demostrado que ésta teoría simplificada describe la mayoría de los fenómenos acústicos normales.

La deducción de la ecuación de ondas acústica en un fluido no viscoso, puede realizarse utilizando tres ecuaciones: la conservación de la masa, la fundamental de la dinámica y las propiedades elásticas de los fluidos.

La presión acústica y la velocidad de las partículas del medio están relacionadas entre sí por la ecuación de Euler:

$$grad\ p = -\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \qquad (1.6)$$

De la conservación de la masa se obtiene la relación entre la velocidad de las partículas del medio y la densidad del mismo:

$$div\ \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial t} \qquad (1.7)$$

1. 4.- ONDAS ELASTICAS PLANAS EN UN FLUIDO

Las ondas sonoras en fluidos son ondas longitudinales, (en muchas situaciones no se consideran las tensiones cortantes). Las partículas del medio se desplazan a uno y otro lado en la dirección de propagación de la onda, originando zonas de compresión y rarefacción. Las ondas acústicas más sencillas de estudiar son las armónicas con amplitud, frecuencia y longitud de onda definidas y constituyen los sonidos puros. En la práctica, raramente se encuentran los sonidos puros, pero se conoce del Teorema de Fourier, que cualquier perturbación periódica puede descomponerse en suma de funciones armónicas.

La propiedad característica de las ondas planas es que sus variables acústicas (desplazamiento de la partícula, densidad, presión, etc.) mantienen constante su amplitud en cualquier plano perpendicular a su dirección de propagación.

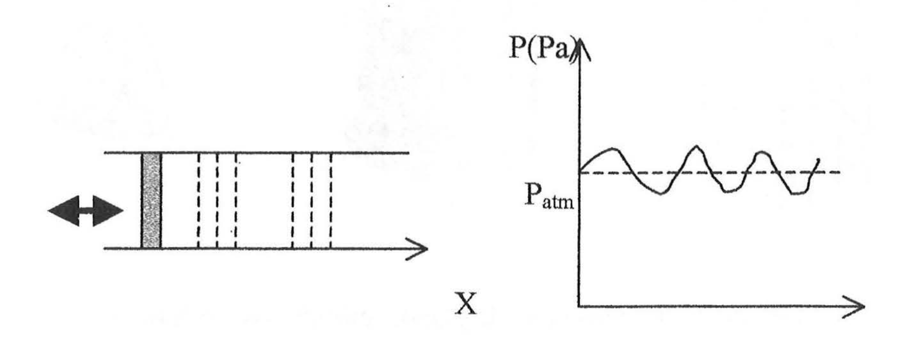


Figura 1.4: Ondas planas en un tubo ilimitado.

Se llama *presión acústica o dinámica*, a la variación de la presión producida en un punto, como consecuencia de la onda que se propaga a través del fluido.

$$p = p_i - p_{fr} \tag{1.8}$$

p = presión acústica; p_i = presión instantánea en cualquier punto; p_{fr} = presión del fluido en reposo. En el Sistema Internacional (SI) la unidad es el Pascal; $Pa = \frac{N}{m^2}$

La ecuación de onda se puede escribir en función de la presión acústica, se obtiene

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{B}{\rho_0}\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \tag{1.9}$$

La ecuación es válida para procesos acústicos de pequeña amplitud y cuya velocidad de propagación es $c = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}$, B es el módulo de compresibilidad.

La presión acústica es función de la posición y el tiempo, p = p(x,t). La solución completa de la ecuación anterior tiene dos funciones arbitrarias

$$p(x,t) = p_1(ct-x) + p_2(ct+x) \tag{1.10}$$

c es la velocidad de fase, que es una constante, la velocidad con la que se mueve la forma de la onda. Es importante observar que, mientras la forma de la onda se mueve con la velocidad de fase, las partículas del medio se mueven alrededor de las posiciones de equilibrio con una velocidad mucho menor.

La forma compleja de la solución armónica para la presión acústica de una onda plana es:

$$\overline{p} = p_1.e^{i(wt-kx)} + p_2.e^{i(wt+kx)} \tag{1.11}$$

Velocidad de las ondas sonoras en el aire.

Una buena aproximación es considerar que, cuando una onda sonora se propaga en un gas, al ser estos en general malos conductores del calor, las variaciones de presión y

volumen ocurren de forma adiabática. Esto equivale a considerar que todo el trabajo para comprimir el gas incrementa su energía interna. Se obtiene:

$$c=\sqrt{\frac{\gamma p}{\rho_0}}=\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}=Cte.\sqrt{T} \qquad (1.12)$$

La velocidad de propagación del sonido en el aire es proporcional a la raíz cuadrada de su temperatura absoluta. Considerando γ = 1,4 para el aire, R = 8,31.10^3 J/kmol.K y la masa molecular del aire M= 29 kg/kmol, la velocidad de propagación del sonido en el aire se puede escribir $c=20{,}05\sqrt{T}$ m/s

Para temperaturas próximas a 20ºC, la velocidad del sonido es c = 331,4 + 0,6θ m/s, donde θ en ºC.

Relación entre las amplitudes de la onda de presión y la onda de desplazamiento en un medio fluido.

La presión sonora el oído humano la detecta fácilmente y es la magnitud física que más se suele medir en Acústica. Consideremos que las ondas de desplazamiento son armónicas

$$\xi(x,t)=\xi_0 \operatorname{sen}(kx-wt) \qquad (1.13)$$

ξ_0, es el máximo desplazamiento respecto de la posición de equilibrio de una partícula fluida. La onda de presión sonora está relacionada con el desplazamiento mediante la expresión

$$p(x,t)=-B\frac{\partial\xi}{\partial x}=-Bk\xi_0\cos(kx-wt)=p_0\cos(kx-wt) \qquad (1.14)$$

B es el módulo de compresibilidad del medio. Se define como el cociente, con signo negativo, entre la variación de presión, (presión acústica p), y la deformación unitaria de volumen.:

$$B=-\frac{p}{\frac{\Delta V}{V}} \qquad (1.15)$$

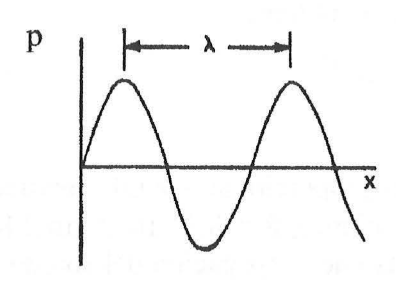
La onda de desplazamiento está desfasada 90º respecto a la onda de presión. Es decir, en un punto donde la elongación es máxima o mínima, la presión sonora es nula, y cuando la elongación es nula la presión sonora es máxima.

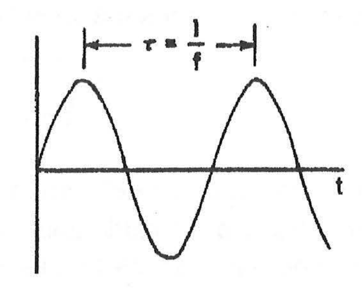
La presión sonora varía en torno a su posición de equilibrio con una amplitud:

$$p_0=Bk\xi_0=\rho c^2 k\xi_0=\rho c^2\frac{2\pi}{\lambda}\xi_0=2\pi\rho cf\xi_0 \qquad (1.16)$$

La velocidad de la partícula fluida se obtiene de la expresión: $v=\frac{\partial\xi}{\partial t}$

Para un tono puro de 1 kHz, la presión más débil que percibe el oído humano es 2.10^{-5} Pa y la elongación correspondiente es 10^{-11} m, amplitud comparable a las dimensiones moleculares. Esto nos muestra la gran sensibilidad del oído humano. A una frecuencia de 1 kHZ, para que las variaciones de presión sean audibles, deben estar comprendidas entre 2.10^{-5} Pa y 29 Pa, este último valor es la presión mayor que puede soportar el oído humano en esa frecuencia sin que aparezcan efectos dolorosos. Para cada frecuencia, el oído humano tiene un umbral de audición y un umbral de dolor.





1) Tiempo fijo 2) Posición fija

Figura 1.5: Onda de presión armónica; 1) p = f(x), 2) p = f(t)

Impedancia acústica

Cuando una fuente sonora emite, produce una perturbación en sus alrededores y puede establecerse una relación entre la causa perturbadora, presión, y el efecto que produce, velocidad de las partículas del medio. Por analogía con la teoría de circuitos, a ésta relación causa-efecto se le denomina impedancia. Existen varios tipos de impedancia:

La *impedancia acústica específica* en un punto se define como el cociente entre la presión acústica en ese punto y la velocidad que las partículas del medio tienen en él, debido exclusivamente a la presión acústica.

$$Z = \frac{p}{v} \qquad \text{Pa.s /m} = \text{N.s/m}^3 \tag{1.17}$$

Es importante para describir fenómenos tales como la propagación del sonido en campo libre, la reflexión del sonido en las superficies interiores de un recinto, reflexiones del sonido sobre el suelo en exteriores, etc.

Si consideramos ondas planas progresivas desplazándose en sentido positivo o negativo

$$Z = \frac{p}{v} = \frac{-B\frac{\partial \xi}{\partial x}}{\frac{\partial \xi}{\partial t}} = \pm \rho_0 c \qquad \frac{Pa.s}{m} = \frac{N.s}{m^3} \tag{1.18}$$

La impedancia característica de una onda plana progresiva, es una característica del medio, independiente de la posición y del instante de tiempo. Es una medida de la oposición del medio a que sus partículas se desplacen en su interior. Al producto $\rho_0 c$ se le llama *impedancia característica o resistencia del medio.*

Ejemplos:

a) El *aire* a temperatura de 25°C y presión de una atmósfera, su densidad es de 1,18 kg/m^3 y la velocidad del sonido 346,1 m/s y su impedancia característica es de 410 Pa.s/m
b) b) A la temperatura de 20°C y presión de una atmósfera, en el caso del *agua destilada,* de densidad 998 kg/m^3 y velocidad del sonido 1.482 m/s, su impedancia característica es 1,48.10^6 Pa.s/m.

En general, para ondas planas estacionarias y ondas esféricas, la impedancia acústica no permanece constante, y es una cantidad compleja, Z = X + iY.

X, es la resistencia acústica específica del medio, e Y es la reactancia acústica específica del medio.

La *impedancia acústica específica normal* se define como la relación compleja de la presión sonora y la componente normal de la velocidad de la partícula en un plano

$$Z_n = \frac{p}{v_n} \quad N.s/m^3 \quad (rayl\ SI) \tag{1.19}$$

Intensidad acústica de las ondas planas

La intensidad acústica, I es el valor medio de la energía acústica transmitida por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación de la onda en la unidad de tiempo, o bien el valor medio de la potencia acústica instantánea por unidad de área. La intensidad instantánea es el producto de la presión y velocidad instantáneas de las partículas del medio material.

Su valor medio en un periodo de tiempo T es

$$I = \frac{1}{T}\int_0^T \rho c \xi_0^2 w^2 \cos^2(kx - wt) = \frac{1}{2}\rho c \xi_0^2 w^2 \ \text{W/m}^2 \tag{1.20}$$

La intensidad promedio depende de los cuadrados de la amplitud y la frecuencia.

Se puede expresar en función de la presión máxima y de la impedancia característica de la onda plana.

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho c} = \frac{p_0^2}{2Z} \quad \text{W/m}^2 \tag{1.21}$$

El valor medio de la presión acústica es aproximadamente nulo al tomar valores positivos y negativos, por esta razón es útil relacionarlo con la energía que transporta y, en consecuencia, se utiliza la presión sonora eficaz. Ésta se determina a partir de la raíz cuadrada del valor medio temporal del cuadrado de la presión acústica instantánea.

$$p_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T p^2(t)dt} \tag{1.22}$$

En el caso de ondas armónicas planas: $p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}}$ (1.23)

La intensidad media se puede escribir:

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho c} = \frac{p_0^2}{2Z} = \frac{p_{ef}^2}{Z} \tag{1.24}$$

1.5.- ONDAS ESFÉRICAS EN UN FLUIDO

Consideramos el estudio de las ondas de presión en un fluido homogéneo e isótropo en reposo. La ecuación general de onda en tres dimensiones en coordenadas rectangulares es:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 (\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}) \quad (1.25)$$

p es la presión acústica y $c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$ es la velocidad de fase.

En coordenadas esféricas la ecuación general de ondas se expresa

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 (\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 sen^2 \theta} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \tan \theta} \frac{\partial p}{\partial \theta}) \quad (1.26)$$

Si la pulsación de la esfera es armónica, las ondas divergentes o convergentes resultantes de presión se escriben en forma compleja

$$p(r,t) = \frac{A}{r} e^{i(kr \mp \omega t)} \quad (1.27)$$

A es una constante arbitraria, real o compleja; ω es la pulsación y k el número de onda. Si se considera la parte real

$$p(r,t) = \frac{A}{r} \cos(kr \mp \omega t) \quad (1.28)$$

Para cada valor fijo del tiempo t, representa un conjunto de esferas concéntricas. Cada frente de onda está dado por kr = cte. Una onda esférica disminuye su amplitud al separarse del origen.

Impedancia acústica específica de las ondas esféricas armónicas divergentes.

La impedancia acústica específica se define como la relación de la presión a la velocidad en cualquier punto de la onda. La velocidad de las partículas del medio no está en fase con la presión. La impedancia acústica específica es

$$z = \frac{p}{v} = \frac{i\rho_0 w}{(\frac{1}{r} + ik)} = \frac{\rho_0 c (kr)^2}{(1 + (kr)^2)} + i \frac{\rho_0 ckr}{(1 + (kr)^2)} \quad (1.29)$$

La parte real es la resistencia acústica específica y la parte imaginaria es la reactancia acústica específica, ésta representa el almacenamiento y liberación de energía, ya que las capas sucesivas del fluido se deben dilatar y comprimir. El módulo de la impedancia acústica específica es

$$|z| = \frac{\rho_0 ckr}{\sqrt{1 + (kr)^2}} \quad (1.30)$$

De la expresión de la impedancia acústica específica se puede concluir que para valores pequeños de $kr = \frac{2\pi r}{\lambda}$, los dos términos de la impedancia tienden a cero. Para valores grandes de kr el término resistivo se aproxima a $\rho_0 c$, mientras que la parte reactiva se aproxima a cero.

En forma exponencial la impedancia se escribe:

$$z = |z|e^{i\theta} = \frac{\rho_0 ckr}{\sqrt{1+(kr)^2}} e^{i\theta} = \rho_0 c.\cos\theta.e^{i\theta} \qquad (1.31)$$

Intensidad acústica de las ondas esféricas armónicas divergentes

En la dirección normal a la superficie de onda y a una distancia r de su centro de emisión, en posiciones no próximas a la fuente, se escribe:

$$I(r) = \frac{p_{ef}^2(r)}{\rho_0 c} \quad \frac{W}{m^2} \qquad (1.31)$$

La expresión de la intensidad para ondas esféricas es igual que para ondas planas.

1.6.- ONDAS CILÍNDRICAS EN UN FLUIDO

Otro tipo de geometría del frente de ondas son las ondas cilíndricas. La ecuación diferencial de las ondas en coordenadas cilíndricas es:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial p}{\partial r}\right)\right) \qquad (1.31)$$

Al separar las variables se obtiene la ecuación de Bessel. Las soluciones de la ecuación, cuando r es lo suficientemente grande se pueden aproximar a formas trigonométricas sencillas

$$p(r) \approx \frac{A}{\sqrt{r}} e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r} \mp \omega t)}$$
$$p(r) \approx \frac{A}{\sqrt{r}} \cos(kr \mp \omega t) \qquad (1.32)$$

Representa un conjunto de cilindros circulares coaxiales que llenan todo el espacio, alejándose o acercándose a una fuente lineal infinita..

1.7.- ONDAS EN LOS SÓLIDOS

Los sólidos admiten la aplicación de fuerzas transversales y en consecuencia se pueden producir en ellos otros tipos de ondas diferentes a las longitudinales (ondas de densidad). En la propagación del sonido en los sólidos, la definición de los campos acústicos es mas complicada, pues en estos se producen estados tensionales de naturaleza algebraica tensorial, en lugar de la presión que es una magnitud física escalar.

Para caracterizar los sólidos elásticos isótropos, es suficiente con el conocimiento de dos constantes elásticas. El estudio de las ecuaciones de movimiento de un elemento de volumen, en el caso de sólidos isótropos ilimitados, muestra que al variar la tensión sobre su superficie, únicamente se pueden propagar dos tipos de ondas las de dilatación o longitudinales y las de distorsión o transversales. En el caso de sólidos isótropos finitos es necesario tener en consideración las condiciones de contorno apropiadas. Algunos ejemplos de ondas en sólidos elásticos son las ondas cuasilongitudinales, las de flexión y las de torsión.

1.7.1.- ONDAS EN MEDIOS ILIMITADOS

ONDAS LONGITUDINALES (DE COMPRESION O DILATACIÓN)

Estas ondas son parecidas a las que se propagan en los fluidos. Se originan únicamente en medios ilimitados, es decir en medios en donde sus dimensiones en todas las direcciones son mucho mayores que la longitud de onda. La velocidad de propagación para estas ondas es c_L

λ

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \qquad (1.33)$$

E es el módulo de elasticidad de Young, ν el coeficiente de Poisson de contracción lateral y ρ la densidad volumétrica del sólido. Las ondas longitudinales tienen la mayor velocidad de propagación.

ONDAS TRANSVERSALES (DE CORTE O ISOSTÉRICAS)

Las ondas transversales se producen únicamente en medios sólidos ilimitados. El paso de la onda produce una deformación de cortadura (cizalladura), sin cambio de volumen. Su velocidad de propagación es c_T

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \qquad (1.34)$$

G es el módulo de cizalladura.

La relación entre las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales es

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \qquad (1.35)$$

En muchos materiales, las ondas longitudinales se propagan 1,8 veces más rápidas que las transversales.

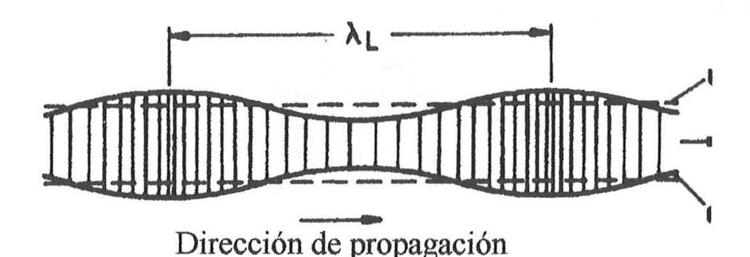
1.7.2.- ONDAS EN SÓLIDOS FINITOS

En los sólidos finitos se pueden propagar un gran número de formas de onda. Indicaremos aquellos que son más interesantes en la acústica de la edificación.

ONDAS CUASILONGITUDINALES

Son ondas longitudinales en medios limitados que están siempre acompañadas de ondas transversales. Aparecen cuando al menos la dimensión del medio en una dirección es

menor que la longitud de onda de la onda longitudinal (varillas, placas, etc.). El posible desplazamiento lateral tiene como consecuencia que el medio sea algo flexible y la velocidad de propagación sea algo menor que en las ondas longitudinales. A continuación se muestran las expresiones de las velocidades de propagación en varillas y placas.



$$\text{En varillas } C_{CL} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{1.36}$$

$$\text{En placas } C_{CL} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \tag{1.37}$$

ONDAS DE FLEXIÓN

Las ondas de flexión son las más importantes para la propagación del sonido en medios sólidos y es imprescindible tenerlas en consideración en el aislamiento acústico. En la onda de flexión aparece un movimiento transversal y un movimiento angular. Su velocidad de propagación no es constante, a diferencia de las ondas estudiadas anteriormente, sino que aumenta con la raíz cuadrada de la frecuencia

$$C_F = \sqrt{\omega}\sqrt[4]{\frac{B}{m}} \tag{1.38}$$

m, es la masa por unidad de superficie y B es la rigidez a la flexión del elemento

- Para una placa $B = \dfrac{E.h^3}{12(1-\nu^2)}$

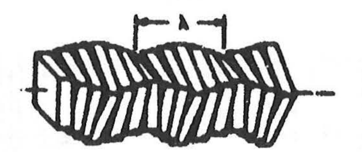
h es el espesor de la placa y ν el coeficiente de Poisson.

-Para una barra $B = \dfrac{E.a.h^3}{12}$

a es la anchura de la barra y h el espesor

ONDAS DE TORSIÓN

Son ondas transversales, en las que la velocidad de propagación está dirigida paralelamente en arcos de circunferencia alrededor del eje de la onda. Pueden aparecer en medios limitados como varillas. La velocidad de propagación está afectada por la geometría de la sección del medio.



En varillas de sección circular $C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ (1.39)

En varillas de sección cuadrada $C_t = 0{,}9\sqrt{\frac{G}{\rho}}$ (1.40)

1.8- POTENCIA ACÚSTICA

La potencia acústica de una fuente, en una banda de frecuencia determinada, es la energía acústica irradiada por la fuente en la unidad de tiempo. En acústica, ésta magnitud se utiliza para caracterizar a las fuentes sonoras. En muchas situaciones la potencia acústica de una fuente se expresa en escala logarítmica.

La potencia que emite una fuente es sólo dependiente de la propia fuente e independiente del lugar donde se encuentra. Puede ser determinada a partir de la siguiente expresión:

$$W = \iint_{Superficie} \vec{I}.d\vec{S} \qquad (1.41)$$

donde: W, es la potencia acústica en W; I, es la intensidad acústica en W/m^2; dS es un elemento de superficie.

La integral de superficie es la integral de la componente de la intensidad acústica normal al elemento de superficie. Si la fuente es isotrópica, (omnidireccional) la potencia acústica es

$$W = I.S \qquad (1.42)$$

A la distancia r de una fuente sonora puntual isotrópica la intensidad acústica es

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \qquad \frac{W}{m^2} \qquad (1.43)$$

Algunos ejemplos de potencias acústicas medias emitidas por algunas fuentes son:
Una persona al hablar 10^{-5} W, al gritar 10^{-3} W, un martillo neumático 1 W, una orquesta sinfónica 10 W.

Imaginemos una fuente lineal, por ejemplo una autopista con tráfico intenso, una tubería por la que circula un fluido, etc. Se puede considerar que está formada por una alineación de fuentes puntuales. La intensidad sonora a una distancia r de su eje es

$$I = \frac{W_L}{2\pi r} \qquad W/m^2 \qquad (1.44)$$

donde W_L es la potencia sonora por unidad de longitud de la fuente. En éste caso, la intensidad sonora decrece con el inverso de la distancia.

Existen diversas normas ISO para determinar la potencia acústica de las fuentes, pudiendo determinarse en cámaras reverberantes, anecoicas y semianecoicas. También puede realizarse el cálculo de la potencia acústica mediante sondas de intensidad sonora.

1.9.- FENOMENOS DE PROPAGACIÓN EN UN MOVIMIENTO ONDULATORIO

Los aspectos más importantes de las ondas son su velocidad de propagación y las modificaciones que éstas experimentan cuando cambian las propiedades físicas del medio, (reflexión y refracción), cuando se interponen diferentes clases de obstáculos en sus caminos, (difracción, dispersión), o cuando varias ondas coinciden en la misma región del espacio,(interferencia).

Propagación de las ondas. Principio de Huygens.

La propagación de una onda está descrita por las ecuaciones del campo al cual la onda pertenece, sin embargo, es también posible determinar la amplitud de una onda en un punto particular del espacio, mediante una representación gráfica, ideada por C. Huygens en 1680, para las ondas mecánicas. Recordemos que un frente de ondas es el lugar geométrico de los puntos de un medio, alcanzados por el movimiento ondulatorio, que están en fase en un mismo instante de tiempo.

Huygens visualizó un método para pasar de un frente de ondas a otro, supuso que cada uno de los puntos del frente de onda, al ser alcanzado por la perturbación, se convierte en una fuente secundaria con las mismas características que la fuente original, es decir la misma frecuencia y velocidad de propagación.

Figura 1.6: Construcción de Huygens del frente de ondas

Si se considera una superficie de onda S, ésta se convierte en una fuente de emisión de ondas secundarias, que avanzan de manera que un instante de tiempo posterior alcanzan

la próxima capa de partículas del medio. La superficie envolvente S′, es la nueva fuente emisora de ondas secundarias, y así sucesivamente.

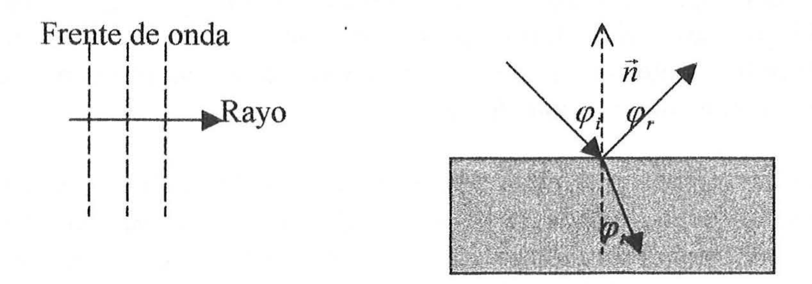
En el procedimiento de Huygens no se tiene en cuenta la propagación hacia atrás. En el siglo XIX Fresnel modificó algo el principio de Huygens, y posteriormente Gustav Kirchhoff demostró que el principio de Huygens-Fresnel era una consecuencia directa de la ecuación diferencial de onda teniendo en cuenta las condiciones de contorno.

1.10- REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

El hecho de que la velocidad de propagación de una onda dependa de las propiedades del medio da lugar a los fenómenos de reflexión y refracción, que ocurren cuando una onda cruza la superficie de separación de dos medios, en los cuales la onda se propaga con diferentes velocidades. La onda reflejada es una nueva onda que se propaga en el medio en el cual la onda original se estaba propagando. La onda refractada es la onda que se transmite al segundo medio.

En el caso de las ondas sonoras, el cambio de impedancia del medio de propagación provoca un cambio en la velocidad del sonido y una variación del frente de onda. La cantidad de energía sonora reflejada por una superficie depende del tipo de superficie y juega un papel muy importante en el control del campo sonoro en un recinto.

Por conveniencia, se suele definir un instrumento matemático denominado *rayo* que, en el caso de medios isótropos, es una línea que en todos los puntos es ortogonal a los frentes de onda. En los medios homogéneos e isótropos los rayos son líneas rectas. Los rayos son aproximaciones de las ondas únicamente en ciertas situaciones muy particulares.



Las leyes de la reflexión y refracción para ondas planas son:

1) Los rayos incidente, reflejado y refractado son coplanarios están contenidos en el plano de incidencia, (plano formado por el rayo incidente y la normal al plano de la interfase).
2) El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
3) Los senos de los ángulos de incidencia y refracción son proporcionales a las velocidades de propagación en los medios de la onda incidente y refractada, ley de Snell.

$$\frac{sen\varphi i}{c_i} = \frac{sen\varphi_t}{c_t} \qquad (1.45)$$

En la reflexión de las ondas sonoras hay que tener en cuenta la longitud de onda incidente y la densidad del medio reflector. Si la longitud de onda incidente es mucho menor que las irregularidades de la superficie, la reflexión es especular, si son parecidas la reflexión es difusa, y el rayo incidente se refleja en todas las direcciones de acuerdo con la ley de Lambert.

1.11.- SUPERPOSICIÓN E INTERFERENCIA.

Una pregunta importante es: ¿qué ocurre cuando dos o más movimientos ondulatorios coinciden en el espacio y en el tiempo?. En un medio elástico lineal, es decir en un medio en donde la fuerza de recuperación es proporcional al desplazamiento del mismo, se puede aplicar el principio de superposición.

Principio de superposición: cuando se propagan dos o más ondas por un medio, la perturbación resultante en cada punto del mismo, es igual a la suma algebraica de las perturbaciones que producirían cada una de las ondas por separado.

Una característica muy importante del movimiento ondulatorio es el *fenómeno de interferencia.* Este fenómeno ocurre cuando dos o más movimientos ondulatorios coinciden en el espacio y en el tiempo, bajo unas ciertas condiciones. Dos fuentes sonoras que están en fase o que tienen una diferencia de fase constante se dice que son *coherentes. El fenómeno de la interferencia se observa únicamente en el caso de ondas procedentes de fuentes coherentes.* Las ondas procedentes de fuentes incoherentes tienen una diferencia de fase que varía aleatoriamente con el tiempo, de manera que la interferencia en un punto determinado varía de constructiva a destructiva o viceversa de forma irregular, no manteniendo un esquema de interferencia.

Una causa corriente de diferencia de fase entre dos ondas es una diferencia en la longitud a recorrer por cada una de las ondas. Otro ejemplo sencillo de interferencia son las ondas estacionarias: dos ondas que viajan en direcciones opuestas en un medio material se combinan para producir una configuración de onda estacionaria con nodos y antinodos que no se mueven. No hay flujo de energía en ninguna dirección.

Los batidos o pulsaciones son el resultado de interferencias entre dos ondas de frecuencias ligeramente diferentes. La frecuencia de la pulsación es la diferencia entre las frecuencias de las ondas.

Superposición de dos ondas de la misma frecuencia

Consideremos que en un punto del espacio se superponen dos ondas de la misma frecuencia y velocidad de fase.

$$p_1(x,t) = A_1 \operatorname{sen}[\omega t - (kx_1 + \varphi_1)] = A_1 \operatorname{sen}(\omega t - \phi_1), \qquad \phi_1 = kx_1 + \varphi_1 \qquad (1.46)$$

$$p_2(x,t) = A_2 \operatorname{sen}[\omega t - (kx_2 + \varphi_2)] = A_2 \operatorname{sen}(\omega t - \phi_2), \qquad \phi_2 = kx_2 + \varphi_2 \qquad (1.47)$$

En notación compleja

$$p_1(x,t) = A_1 . e^{i(\omega t - \phi_1)} \; , \; p_2(x,t) = A_2 . e^{i(\omega t - \phi_2)} \qquad (1.48)$$

la perturbación resultante es la superposición lineal de estas ondas:

$$p(x,t) = p_1(x,t) + p_2(x,t) \qquad (1.49)$$

$$p(x,t) = (A_1.e^{-i\phi_1} + A_2.e^{-i\phi_2}).e^{i\omega t} = A_R.e^{-i\phi_R}.e^{i\omega t} \quad (1.50)$$

La amplitud resultante es

$$A_R = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\delta} \quad (1.51)$$

el último término del segundo miembro de la expresión anterior es el *término de interferencia*. La fase resultante se obtiene de

$$tg\phi_R = \frac{A_1 sen\phi_1 + A_2 sen\phi_2}{A_1\cos\phi_1 + A_2\cos\phi_2} \quad (1.52)$$

La perturbación resultante es

$$p(x,t) = A_R\,sen(wt + \phi_R) \quad (1.53)$$

La onda compuesta es armónica y de la misma frecuencia que las constituyentes, pero su amplitud y fase son diferentes.

El factor más importante es la diferencia de fase entre las dos ondas que interfieren

$$\delta = \phi_2 - \phi_1 = (kx_2 + \varphi_2) - (kx_1 + \varphi_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(x_1 - x_2) + (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1.54)$$

La diferencia de fase puede aparecer como una diferencia en la longitud del camino atravesado por las ondas o también por una diferencia en la fase inicial.

En la expresión de la amplitud resultante, observamos que esta varía entre los siguientes casos extremos $\cos\delta = \pm 1$, el primero ocurre para $\delta = 2\pi n$ y el segundo para $\delta = (2n+1)\pi$, donde n es un número entero. En el primer caso tenemos el máximo refuerzo, *interferencia constructiva*, y en el segundo la máxima atenuación, *interferencia destructiva*.

Un caso particular es cuando las ondas están inicialmente en fase en sus fuentes emisoras, o bien que ondas de la misma fuente sigan caminos diferentes, entonces $\varphi_1 = \varphi_2$ y $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1)$. En este caso se puede escribir:

Para el caso de interferencia constructiva

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(x_1 - x_2) = 2\pi n \Rightarrow x_1 - x_2 = n\lambda \quad (1.55)$$

Para el caso de interferencia destructiva

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(x_1 - x_2) = (2n+1)\pi \Rightarrow x_1 - x_2 = (2n+1)\frac{\lambda}{2} \quad (1.56)$$

La diferencia de distancias $x_1 - x_2$ = constante, define en el espacio superficies hiperbólicas de revolución. Cuando se produce la interferencia constructiva las superficies se llaman *ventrales o antinodales*, y cuando la interferencia es destructiva las superficies se llaman *nodales*.

Se pueden obtener, para el caso de la superposición de N ondas de igual frecuencia, las expresiones siguientes para la amplitud y fase resultante.

$$A_R = \sqrt{(\sum A_i\cos\phi_i)^2 + (\sum A_i sen\phi_i)^2} \quad (1.57)$$

$$tg\phi_R = \frac{\sum A_i sen\phi_i}{\sum A_i \cos\phi_i} \quad (1.58)$$

Un caso de interés particular en acústica es el de las pulsaciones o batidos. Pueden definirse como la variación periódica en un punto dado, debido a la interferencia de dos ondas de la misma amplitud y frecuencias ligeramente diferentes que viajan en la misma dirección. Es una interferencia temporal a diferencia de la interferencia de ondas en cuerdas y tubos, interferencia espacial. Se puede probar que la amplitud de la onda superpuesta varía en el tiempo con una frecuencia $(f_1 - f_2)/2$. Hay dos máximos de amplitud o pulsaciones en cada ciclo. La frecuencia de pulsación es: $f_b = f_1 - f_2$. El oído humano es sensible hasta seis o siete pulsaciones por segundo. De esta forma pueden afinarse los instrumentos musicales reduciendo al mínimo las pulsaciones producidas entre un sonido del instrumento y un sonido patrón.

Ondas estacionarias en una dimensión

Un caso particular de interferencia, se produce cuando se superponen dos ondas armónicas de la misma frecuencia propagándose en la misma dirección y sentido opuesto.

$$p_1(x,t) = p_{01}\, sen(kx - \omega t) \quad (1.59)$$
$$p_2(x,t) = p_{02}\, sen(kx + \omega t) \quad (1.60)$$

Se aplica el principio de superposición

$$p(x,t) = p_1(x,t) + p_2(x,t)$$

y se obtiene: $p(x,t) = (p_{01}+p_{02}) sen\, kx \cos\omega t + (p_{02}-p_{01}) \cos kx\, sen\omega t$ (1.61)

En el caso particular en donde las amplitudes de las dos ondas que se superponen son iguales, $p_0 = p_{01} = p_{02}$., se obtiene

$$p(x,t) = 2p_0\, sen\, kx \cos\omega t = A_R \cos \omega t \quad (1.62)$$

El movimiento resultante es armónico simple de amplitud variable A_R. El resultado no es una onda progresiva. Obsérvese que no existe diferencia de fase entre las oscilaciones de las partículas situadas en posiciones diferentes, las oscilaciones están sincronizadas y no hay ninguna propagación de onda neta.

La presión resultante se anula en los puntos (nodos) que cumplen:

$$kx = n\pi, \qquad x = n\lambda/2 \qquad n = 0, 1,2,..$$

La presión resultante será máxima (antinodos) en los puntos:

$$kx = (2n+1)\frac{\pi}{2} \quad x = (2n+1)\frac{\lambda}{4} \qquad n = 0,1,2,..$$

Si a lo largo de un medio por el que se desplazan las ondas, existen una serie de puntos que permanecen en reposo, es imposible transmitir energía más allá de esos nodos. No es una onda progresiva, de ahí el nombre de estacionaria. Las ondas estacionarias oscilan pero no se propagan, la energía no se propaga por el medio, se almacena en él.

Todos los puntos del mismo se mueven con movimiento armónico simple de la misma frecuencia y amplitud variable, de acuerdo con su posición.

Un patrón más complicado de interferencia se produce, en tres dimensiones, en el interior de un recinto. El fenómeno de las ondas estacionarias es muy importante en la acústica arquitectónica. Este fenómeno lo analizaremos al estudiar el comportamiento del campo sonoro en un recinto a bajas frecuencias.

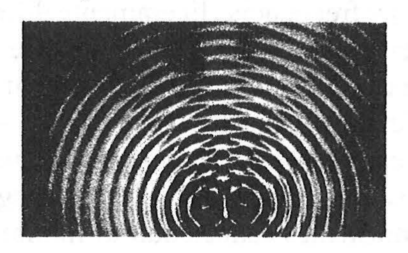


Figura 1.7: Interferencia de dos fuentes puntuales que oscilan en fase en una cubeta de ondas.

1.12.- DIFRACCIÓN

Todos estamos acostumbrados a la idea de que el sonido dobla las esquinas. La difracción se observa cuando se distorsiona una onda por un obstáculo cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda de aquella. *La difracción es la curvatura de una onda alrededor de un obstáculo o borde de una abertura.* Se presenta siempre que el frente de onda está limitado de alguna manera. Cuando el obstáculo o la abertura es grande en comparación con la longitud de onda, la difracción es despreciable y la onda se propaga en línea recta como un haz de partículas. Esto se conoce como aproximación de rayos. Debido a la difracción, las ondas únicamente pueden utilizarse para localizar objetos cuyas dimensiones estén dentro del margen de una longitud de onda aproximadamente.

Desde el punto de vista físico, no hay una diferencia significativa entre interferencia y difracción. Sin embargo, es usual, hablar de interferencia cuando se analiza la superposición de únicamente unas pocas ondas y de difracción cuando el numero de ondas es muy grande.

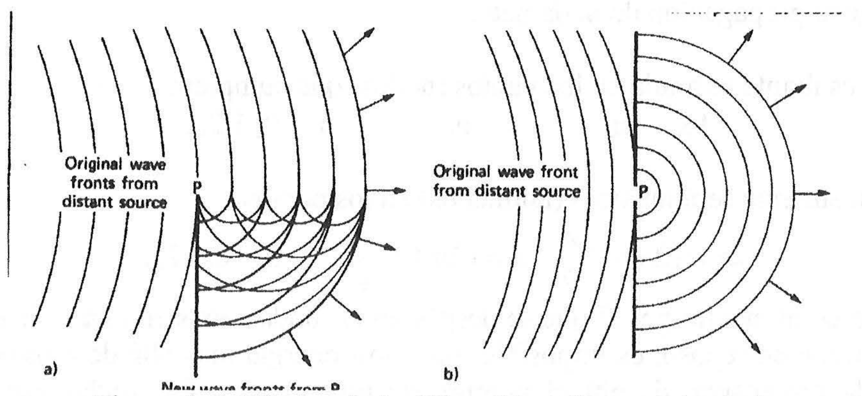


Figura 1.8: Efectos de la difracción a frecuencias bajas

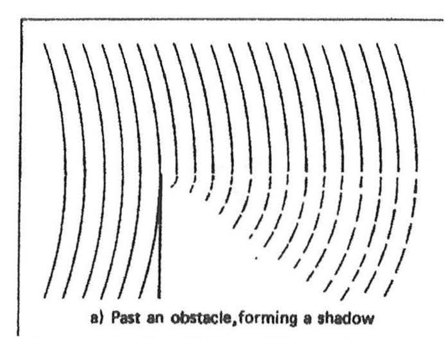


Figura 1.9: Efectos de la difracción a frecuencias altas.

Los fenómenos de difracción son muy importantes en la propagación del sonido al aire libre y en los recintos.

1.13.- COEFICIENTES DE REFLEXION, ABSORCIÓN Y TRANSMISIÓN

Cuando las ondas sonoras se propagan en un medio (sólido o fluido) y se encuentran con la superficie de separación de otro medio distinto, se producen los fenómenos de reflexión y transmisión del sonido, debido al hecho de que la velocidad de propagación es distinta en cada medio y depender esta de las propiedades elásticas e inerciales de los mismos.

Cuando el sonido se propaga en un recinto incide, sobre las paredes, techo, suelo y objetos que están en su interior. Parte de esta energía es reflejada al recinto, siendo la causa de la *acústica del recinto* y también de la complejidad del campo sonoro en el mismo. En Acústica Arquitectónica, cuando la energía acústica incide sobre una superficie, la parte de la energía no reflejada, se dice que es absorbida a través de la superficie de separación. Es de gran interés práctico para el control del campo acústico en un recinto, el conocimiento de la absorción acústica de los materiales de acabado, objetos y ocupantes

La determinación precisa de las características de las ondas reflejadas y las transmitidas es bastante compleja, excepto en el caso de una onda plana incidiendo sobre la superficie de separación de dos medios con un ángulo de incidencia nulo.

Reflexión de ondas planas a incidencia normal entre dos medios ilimitados.

Cuando una onda de presión se desplaza e incide normalmente sobre el plano de separación de dos medios diferentes de impedancias acústicas Z_1 y Z_2, una parte es reflejada y otra transmitida (absorbida).

Se define como coeficiente de amplitud de reflexión de la presión acústica, R, o factor de amplitud de reflexión, al cociente entre la amplitud de la onda de presión reflejada y la incidente. De idéntica forma, el coeficiente de amplitud de transmisión de la presión acústica, T es el cociente entre la amplitud de la onda transmitida y el de la incidente.

$$R = \frac{p_r}{p_i} \quad (1.63) \qquad T = \frac{p_t}{p_i} \quad (1.64)$$

Las condiciones que se deben cumplir en todo instante de tiempo y en todos los puntos de la superficie de separación son:

- Las presiones acústicas a ambos lados de la superficie de separación son iguales.
- Las proyecciones de las velocidades sobre la normal a la superficie de separación son iguales.

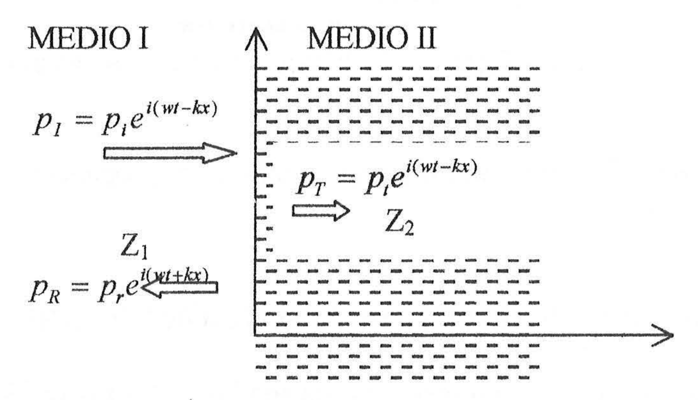


Figura 1.10: Reflexión de ondas planas a incidencia normal entre dos medios ilimitados

La primera condición, continuidad de la presión, significa que no puede haber una fuerza neta en la frontera que separa los dos medios. La segunda, continuidad de la velocidad normal, requiere que los medios I y II permanezcan en contacto.

En x = 0, $\quad p_I + p_r = p_T , \Rightarrow 1 + R = T;$ (1.65)

$$v_i - v_r = v_t , \Rightarrow \frac{p_i}{Z_1} - \frac{p_i R}{Z_1} = \frac{p_i T}{Z_2}, \ \frac{1}{Z_1}(1-R) = \frac{T}{Z_2} \quad (1.66)$$

combinando las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1.67) \qquad R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1.68)$$

Los dos coeficientes están determinados por las impedancias características de los dos medios. Casos particulares:

$Z_1 = Z_2$ $\quad$ R = 0, T = 1, *la onda es totalmente transmitida*

$Z_1 >> Z_2$ $\quad$ R→ -1, *contorno libre*

Si $Z_1 << Z_2$, R→ 1, *contorno rígido*, en este caso la presión total delante de la pared será el doble. $p_i + p_r = 2p_i$. Este hecho es muy importante al realizar medidas acústicas en la proximidad de los contornos rígidos.

Se define el coeficiente de reflexión de la energía como el cociente entre la intensidad reflejada y la intensidad incidente

$$\alpha_r = R^2 = \frac{I_r}{I_i} = \frac{p_r^2}{p_i^2} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2 \quad (1.69)$$

En acústica arquitectónica, a toda la energía no reflejada se dice que es absorbida a través de la superficie de separación, y se define el coeficiente de absorción de la superficie de separación a incidencia normal de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} = 1 - \alpha_r = 1 - R^2 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \qquad (1.70)$$

En la mayoría de los casos, el espesor del material de impedancia Z_2 es finito y hay dos superficies de separación (caso de paredes, techos,..). Parte de la energía es disipada en el medio de impedancia Z_2 (I_d) y el resto es transmitido (véase la figura 1.9). Se define el coeficiente de transmisión:

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} = \frac{I_i - I_r - I_d}{I_i} = 1 - \alpha_r - \alpha_d \qquad (1.71)$$

$$\alpha_r + \alpha_d + \tau = 1, \text{ (conservación de la energía acústica)} \qquad (1.72)$$

La energía absorbida es la suma de la energía transmitida y la disipada en el elemento de separación.

$$E_{absorbida} = E_{transmitida} + E_{disipada} \qquad (1.73)$$

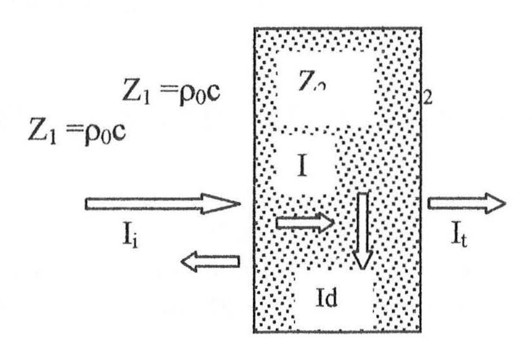


Figura 1.11: Conservación de la energía acústica en una pared de espesor finito.

Por ejemplo en el caso de una ventana abierta $E_r = 0$, $E_{dis} = 0$, $E_i = E_t$, $\alpha = \tau = 1$

Una magnitud muy utilizada en el aislamiento acústico es el índice de reducción acústica R, que se define

$$R = 10.\log\frac{1}{\tau} \quad dB \qquad (1.74)$$

En temas posteriores se desarrollarán los conceptos anteriormente definidos de forma más pormenorizada.

Otra magnitud física muy relacionada con el comportamiento acústico de una pared es la impedancia de la pared Z, (también llamada impedancia acústica específica normal de la pared), definida por:

$$Z = \left(\frac{p}{v_n}\right)_{superficie} \qquad (1.75)$$

p es la presión acústica en la superficie de la pared y v_n es la componente normal de la velocidad de las partículas del medio sobre la pared. En paredes no porosas, la componente normal de la velocidad coincide con la velocidad de vibración de la pared. La impedancia de la pared es una magnitud física que la mayoría de las veces debemos expresar mediante un número complejo, pues la presión acústica generalmente no está en fase con la velocidad de la partícula en la superficie de la pared.

Habitualmente la impedancia de la pared aparece dividida por la impedancia característica del aire, pudiéndose definir la denominada impedancia acústica específica de la pared, ζ

$$\zeta = \frac{Z}{\rho_0 c} \tag{1.76}$$

Un caso particularmente interesante es cuando la impedancia de la pared es independiente de la dirección del sonido incidente, (medios de reacción local).

El coeficiente de absorción de la superficie de separación a incidencia normal se puede escribir:

$$Z_1 = \rho_0 c, \qquad Z_2 = Z = Z_{real} + Z_{im}$$

$$\alpha = 1 - \alpha_r = 1 - R^2 = 1 - \left|\frac{Z - \rho_0 c}{Z + \rho_0 c}\right|^2 = 1 - \left|\frac{\zeta - 1}{\xi + 1}\right|^2 = \frac{4 Z_{real} \rho_0 c}{(Z_{real} + \rho_0 c)^2 + Z_{im}^2} \tag{1.77}$$

EJEMPLO DE LONGITUDES DE ONDA EN ALGUNAS FRECUENCIAS DE INTERÉS

Frecuencia Hz	Medio		
	Aire, c = 340 m/s λ, m	Hormigón denso c = 3.400 m/s λ, m	Agua de mar c = 1.500 m/s λ, m
125	2,72	27,2	12
250	1,36	13,6	6
500	0,68	6,8	3
1.000	0,34	3,4	1,5
2.000	0,17	1,7	0,75
4.000	0,085	0,85	0,375

1.14.- PROPIEDADES FÍSICAS DE ALGUNOS MATERIALES

Material	Densidad kg/m³	Módulo de elasticidad E, N/m²	Coeficiente de Poisson, ν	Velocidad de la ondao c_L m/s	Factor de pérdidas, η
Aluminio	2.700	$7,16.10^{10}$	0,33	5.150	$10^{-4} - 10^{-2}$
Cobre	8.900	$4,6.10^{10}$	0,35	2.273	2.10^{-3}
Vidrio	2.500	$6,76.10^{10}$	0,22	5.200	$10^{-3} - 10^{-2}$
Plexiglas, lucita	1.150	$3,73.10^{9}$		1.800	2.10^{-3}
Plomo	11.100	$1,65.10^{10}$	0,43	1.200	0,015
Acero	7.700	$2,07.10^{11}$	0,31	5.150	$10^{-4} - 10^{-2}$
Hormigón ligero	1.300	$3,8.10^{9}$		1.700	
Hormigón denso, vertido	2.300	$2,61.10^{10}$	0,1 – 0,15	3.400	0,005– 0,02
Hormigón poroso	600	2.10^{9}		1.820	
Tablero de yeso	760	2.10^{9}		1.600	0,006– 0,03
Ladrillos, promedio	1.800	$1,6.10^{9}$		3.000	
Corcho	240	$2,5.10^{7}$	0,28	400	0,13 – 0,17
Madera de pino	600	5.10^{9}	0,18	3.000	0,01 – 0,04
Madera contrachapada de abeto	600	$8,7.10^{9}$		3.800	0,01 –0,02
Madera aglomerada	690	$4,5.10^{9}$		2.500	0,005 – 0,01
Madera de teca	900	$1,7.10^{10}$		4.350	0,02
Madera de álamo	500	10^{10}		4.470	0,04
Madera de abeto	550	8.10^{9}		3.800	0,04
Madera de balsa	96 – 176	$(2,1\text{-}5,2).\ 10^{9}$		4.700-5.400	
PVC	1400	$2,4.10^{9}$		1.310	
Poliuretano	900	$1,6.10^{9}$		1.330	
Poliestireno	16 – 32	$(1,2\text{-}3,5).10^{4}$		270 - 320	
Polietileno	930	2.10^{8}		460	
Caucho, blando	950	5.10^{6}	0,5	1.025	0,3
Caucho, duro	1.100	$2,5.10^{9}$	0,4	2.200	0,15
Arena seca	1.500	3.10^{7}		140	
Agua dulce, 20°C	998			1.481	
Agua de mar, 20°C	1.026			1500	
Alcohol etílico, 20°C	790			1.150	
Aceite, 20°C	950			1.540	
Mercurio, 20°C	13.600			1.450	
Aire, 0°C				331,6	
Aire, 20°C				343	
Oxigeno, 0°C				317,2	
Hidrógeno, 0°C				1.269	

El factor de pérdidas de los materiales varía en un rango muy amplio, y es muy sensible a las condiciones de montaje.

2.- LA MEDIDA DEL SONIDO

2.1- INTRODUCCIÓN

Cuando el receptor de las ondas sonoras es un aparato de medida, existen unas leyes físicas bien determinadas, que relacionan entre si la emisión, propagación y recepción con unas determinadas magnitudes físicas como pueden ser la presión, intensidad y potencia acústicas.

En las medidas acústicas se utiliza la escala logarítmica, su utilización se debe fundamentalmente a dos motivos, el primero es que el rango de sonidos que el oído humano puede percibir, tanto en frecuencias como en amplitudes, es muy amplio. Para mantener una precisión constante al medir estas magnitudes, y no manejar un rango de números muy alto se utiliza la escala logarítmica. El otro motivo es que en el rango de frecuencias audibles, el oído humano responde de forma aproximadamente proporcional al logaritmo decimal de los cambios de presión sonora.

Los intervalos aproximados en los que el oído humano joven y sano puede percibir un sonido son: frecuencias, (20 – 20.000) Hz; presiones, $(2.10^{-5} - 10^{3})$ Pa; intensidades, $(10^{-12} - 200)$ W/m^2.

2.2- NIVELES Y DECIBELIOS

Las magnitudes que en Acústica se miden se denominan niveles y siempre están referidas a un nivel cero que corresponde con la referencia respecto a la cual se establece la escala de medida.

Por definición, dos cantidades de energía están en relación de un Belio cuando su cociente es 10, y de n Belios cuando es 10^n. La expresión matemática de esta definición se corresponde con el logaritmo decimal del cociente $n = \log \frac{E_1}{E_2}$

Con el fin de evitar decimales, en Acústica se utiliza el decibelio o décima parte del Belio, dB. El decibelio es una unidad adimensional de medida definida como:

$$L = 10 \log \frac{M}{M_0} \text{ dB, ref } M_0 \qquad (2.1)$$

en la cual L es el nivel en dB, M y M_0 son magnitudes físicas homogéneas, y M_0 es la magnitud de referencia.

En Acústica, la primera vez que aparece el termino decibelio es en un artículo publicado, en el primer número de la revista J.A.S.A, debido a V.O. Knudsen,1929, JASA, vol 1, pag 58.

2.3- NIVEL DE INTENSIDAD ACÚSTICA

Se define por: $$L_I = 10.\log\frac{I_{ef}}{I_0} \quad \text{dB, (ref } I_0 \text{)} \qquad (2.2)$$

I_{ef} es la intensidad acústica eficaz medida en W/m^2, correspondiente al nivel L_I, I_0 es la intensidad de referencia, establecida internacionalmente en 10^{-12} W/m^2.
El valor de la intensidad acústica eficaz es:

$$I_{ef} = I_0.10^{\frac{L_I}{10}} \quad W/m^2 \qquad (2.3)$$

2.4- NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA

Es la magnitud física más utilizada en Acústica y la más sencilla de medir. Al ser la intensidad acústica proporcional al cuadrado de la presión acústica, se define mediante la siguiente expresión:

$$L_p = 10.\log\frac{p_{ef}^2}{p_0^2} = 20.\log\frac{p_{ef}}{p_0} \quad \text{dB, (ref } p_0 \text{)} \qquad (2.4)$$

Por acuerdo internacional, la presión eficaz de referencia es, $p_0 = 2.10^{-5}$ Pa, corresponde al umbral de audición de un tono puro de 1.000 Hz.

Se puede escribir:

$$L_p = 20.\log p_{ef} + 94 \text{ dB, (ref } 2.10^{-5} \text{ Pa)}$$

Con la definición del nivel de presión acústica, la escala de niveles de presiones acústica que representan los umbrales de audición y de dolor, se reducen al rango de 0 a 140 dB, a la frecuencia de 1 kHz.

Conocido el nivel de presión acústica, podemos determinar el valor correspondiente de la presión acústica eficaz, de la siguiente manera:

$$\frac{L_p}{20} = \log\frac{p_{ef}}{p_0} \quad \Rightarrow \quad 10^{\frac{L_p}{20}} = \frac{p_{ef}}{p_0}$$

$$P_{ef} = P_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}} \quad \text{Pa}$$

2.5- NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA

La potencia acústica de una fuente, en una banda de frecuencia, es la energía sonora irradiada por la fuente en la unidad de tiempo. Es útil expresar la potencia acústica de una fuente en escala logarítmica. Por ello se define el nivel de potencia acústica de una fuente, L_W, por

$$L_W = 10.\log\frac{W_{ef}}{W_0} \quad \text{dB, (ref } W_0 \text{)} \qquad (2.5)$$

La potencia de referencia es $W_0 = 10^{-12}$ W y la potencia eficaz se obtiene de la expresión:

$$W_{ef} = W_0 . 10^{\frac{L_W}{10}} \quad W$$

Teniendo en cuenta la potencia de referencia y la definición de nivel de potencia:

$$L_W = 10 . \log W_{ef} + 120 \quad dB, \; (\text{ref } 10^{-12} \text{ W})$$

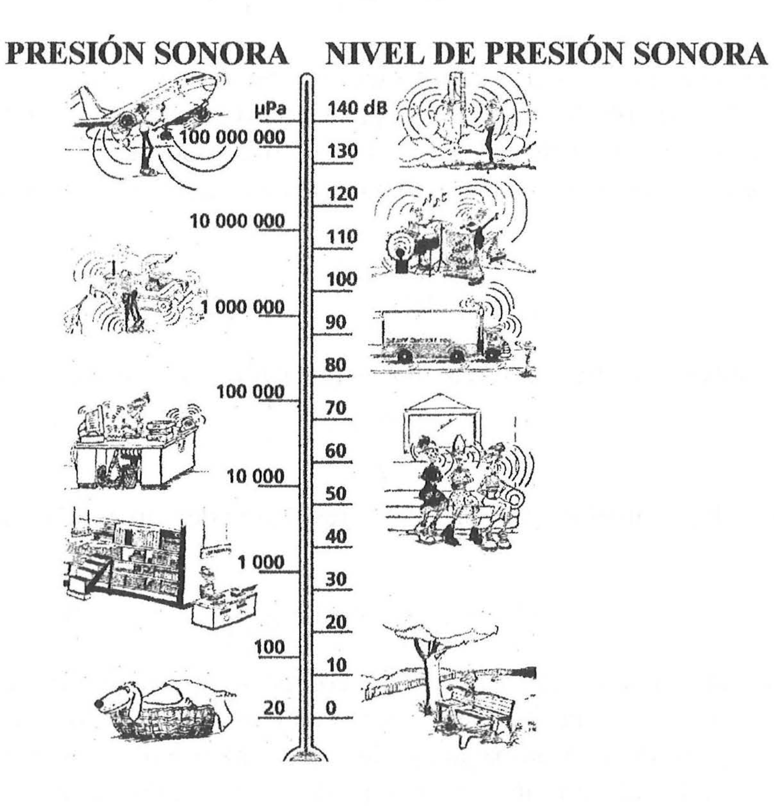
Conviene recordar, que el nivel de potencia acústica es característico de las fuentes sonoras, es independiente del lugar donde coloquemos a estas y de las condiciones ambientales; sin embargo los niveles acústicos de presión e intensidad dependen de la distancia a la fuente y de las condiciones del lugar donde esté colocada la misma.

NIVELES ACÚSTICOS Y CANTIDADES DE REFERENCIA. (Recomendación ISO Nº 1.683, y ANSI S1.8 (1.989)).

Magnitud	Definición, dB	Referencia
Nivel de presión	$L_p = 10 . \log \frac{p_{ef}^2}{p_0^2} = 20 . \log \frac{p_{ef}}{p_0}$	$p_{ref} = 2.10^{-5}$ Pa
Nivel de intensidad	$L_I = 10 . \log \frac{I_{ef}}{I_0}$	$I_{ref} = 10^{-12}$ W/m^2
Nivel de potencia	$L_W = 10 . \log \frac{W_{ef}}{W_0}$	$W_{ref} = 10^{-12}$ W
Nivel de energía	$L_E = 10 . \log \frac{E_{ef}}{E_{ref}}$	$E_{ref} = 10^{-12}$ J
Nivel de densidad de energía	$L_D = 10 . \log \frac{D_{ef}}{D_{ref}}$	$D_{ref} = 10^{-12}$ J/m^3
Nivel de aceleración vibratorio	$L_a = 10 . \log \frac{a_{ef}}{a_{ref}}$	$a_{ref} = 10$ μm/s^2
Nivel de velocidad vibratorio	$L_v = 10 . \log \frac{v_{ef}}{v_{ref}}$	$v_{ref} = 10$ nm m/s
Nivel de desplazamiento vibratorio	$L_d = 10 . \log \frac{d_{ef}}{d_{ref}}$	$d_{ref} = 10$ pm
Nivel de fuerza vibratorio	$L_F = 10 . \log \frac{F_{ef}}{F_{ref}}$	$F_{ref} = 1$ μN
Nivel de frecuencia	$L_{fr} = 10 . \log \frac{f}{f_{ref}}$	$f_{ref} = 1$Hz

L_p, dB	Ejemplo	Evaluación subjetiva
140	Motor de avión, 25 m	Doloroso y peligroso
130	Avión despegando, 100 m	Doloroso y peligroso
120	Tormenta próxima,Conjunto de Rock duro, con refuerzo sonoro	Ensordecedor
110	Motocicleta acelerando, a pocos metros Discoteca	Ensordecedor
100	Multitud en un partido de fútbol Prensa de imprenta	Muy ruidoso
90	Taladradora a 15 m	Muy ruidoso
85	Camión pesado a 15 m	Muy ruidoso
80	Cafetería con paredes reflectantes	Muy ruidoso
70	Aspiradora a 3 m Interior de la cabina de un avión	Ruidoso
65	Automóvil, 100 km/h, a 30 m	Ruidoso
60	Transformador grande a 15 m	Ruidoso
50 –60	Actividad en oficinas	Moderado
30-45	Interior de las viviendas	Moderado
30-40	Biblioteca	Débil
20-25	Susurro	Muy débil
15	Estudio de grabación vacío	Muy débil
0	Umbral de audición de personas jóvenes a 1 kHz	

Tabla 2.1: Niveles de presión sonora producidos por algunas fuentes, ref 2.10^{-5} Pa.



2.6- COMPOSICIÓN DE NIVELES ACUSTICOS

Cuando varias fuentes sonoras producen en un punto del espacio presiones acústicas instantáneas $p_1(t)$, $p_2(t)$,...., $p_n(t)$, la presión acústica resultante es la suma de las presiones acústicas instantáneas de cada una de las fuentes, es decir:

$$p(t) = \sum_{i=1}^{i=n} p_i(t) \qquad (2.6)$$

El nivel de presión acústica se mide a partir de su valor eficaz

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left(p_1(t) + p_2(t) + \ldots + p_n(t)\right)^2 . dt \qquad (2.7)$$

Cuando los sonidos que se superponen son de frecuencias distintas, y proceden de fuentes incoherentes, las integrales de los productos $p_i(t).p_j(t)$ son nulas, y el cuadrado de la presión acústica eficaz es la suma de los cuadrados de las presiones acústicas eficaces producidas por cada una de las fuentes:

$$p_{ef}^2 = p_{1ef}^2 + p_{2ef}^2 + \ldots + p_{nef}^2 \qquad (2.8)$$

En esta caso, la composición de los sonidos se realiza de manera energética, y la intensidad acústica resultante en un punto es la suma de las intensidades de cada una de las fuentes incoherentes en ese punto. Por consiguiente:

$$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n \qquad (2.9)$$

En la práctica, el nivel de presión acústica resultante en un punto, muchas veces no proviene de una sola fuente, y es de gran importancia el conocer la forma en que cada fuente influye en el resultado global. Teniendo en consideración que estamos utilizando unas escalas logarítmicas que no permiten la suma algebraica, el nivel de presión acústica resultante es:

$$L_p = 10.\log\left(\frac{p_{ef}}{p_0}\right)^2 = 10.\log\left(\sum \frac{p_{i,ef}^2}{p_o^2}\right) \qquad (2.10)$$

De la definición de nivel de presión acústica para una fuente j, obtenemos:

$$L_{p,j} = 10.\log\left(\frac{p_{j,ef}}{p_0}\right)^2 \Rightarrow \frac{p_{j,ef}^2}{p_0^2} = 10^{0,1L_{pj}}$$

Sustituyendo, el nivel de presión sonora resultante debido a todas las fuentes es:

$$L_p = L_1 \oplus L_2 \oplus \ldots \oplus L_n = 10.\log\left(\sum_{i=1}^{i=n} 10^{0,1L_{pi}}\right) \ \text{dB} \qquad (2.11)$$

Existen otras situaciones en las que la composición de niveles no puede realizarse de forma energética y tendriamos que tener en consideración lo estudiado en el apartado 1.11. Por ejemplo en la propagación del sonido al aire libre, al tener en cuenta el efecto del suelo. En los últimos años, un campo de investigación acústica muy importante es el control activo del ruido. Se fundamenta en que es posible reducir o eliminar un ruido,

emitiendo, mediante un altavoz, otro ruido de características semejantes al primero, pero en contrafase.

2.7.- LAS MEDIDAS ACÚSTICAS EN AMBIENTES RUIDOSOS. LA CORRECCIÓN POR RUIDO DE FONDO

Cuando queremos medir el nivel de presión acústica producida por una fuente sonora en particular, llamamos ruido de fondo, o ruido ambiental, al producido por otras fuentes distintas a ella. De forma ideal, la medición de los niveles acústicos producidos por las fuentes sonoras debería ser realizada en ausencia de ruidos de fondo significantes, pero esto no suele ser lo habitual, y hay que tener en cuenta las correcciones por el ruido de fondo.

Para determinar el nivel de presión acústica producido por una fuente, L_F, en presencia de un nivel de ruido de fondo, L_{RF}, lo podemos obtener conociendo el nivel combinado de la fuente y el ruido de fondo, L_{F+RF}.

A partir de la relación entre las presiones eficaces

$$p_{F+RF}^2 = p_F^2 + p_{RF}^2 \qquad (2.12)$$

donde

p_F es la presión acústica eficaz de la fuente sin ruido de fondo
p_{RF} es la presión acústica eficaz del ruido de fondo, fuente sin funcionar
p_{R+RF} es la presión acústica eficaz total con la fuente funcionando.

De la definición de nivel de presión acústica se obtienen las siguientes expresiones:

$$L_{F+RF} = L_F \oplus L_{RF} = 10.\log(10^{0,1\,LF} + 10^{0,1\,LRF}) \quad , \text{ref } 2.10^{-5}\text{ Pa} \qquad (2.13)$$

$$L_F = 10.\log(10^{0,1L_{F+RF}} - 10^{0,1L_{RF}}), \quad ref\,2.10^{-5}\ Pa \qquad (2.14)$$

La última expresión se puede utilizar siempre que la diferencia $L_{F+RF} - L_{RF} > 3$ dB, pues una diferencia de menos de 3 dB indica que el nivel de la fuente es menor que el ruido de fondo. Si la diferencia es superior a 10 dB, el ruido de fondo no se tiene en consideración.

2.8.- NIVEL MEDIO DE PRESIÓN ACÚSTICA

El nivel medio de presión acústica en un recinto se define como diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la media espacio-temporal de los cuadrados de las presiones acústicas y el cuadrado de la presión acústica de referencia, tomándose la media espacial en todo el recinto.

Si emiten varias fuentes sonoras con niveles $L_1, ..., L_N$, el nivel medio se obtiene mediante la expresión:

$$L_{av} = 10.\lg\left(\frac{10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + .. + 10^{0,1L_n}}{n}\right) = 10.\lg(10^{0,1L_1} + .. + 10^{0,1L_n}) - 10\lg n \quad dB \qquad (2.15)$$

2.9.- RELACIONES ENTRE LOS NIVELES ACÚSTICOS DE PRESIÓN, INTENSIDAD Y POTENCIA.

En la lección anterior se han hallado unas expresiones que relacionan la intensidad, la presión y la potencia acústica. En este apartado vamos a determinar las relaciones entre sus niveles respectivos en las condiciones de campo acústico libre.

En un medio homogéneo e isótropo, se dice que un campo acústico es *libre* cuando los contornos del medio no tienen influencia sobre las ondas acústicas. Es decir el medio está libre de dispersión y reflexión de las ondas acústicas, las ondas emitidas por la fuente sonora nunca vuelven a la misma. En un recinto esto se consigue en las llamadas cámaras *anecoicas*, estas están diseñadas de manera que sus superficies límites absorben todas las ondas acústicas que inciden sobre ellas.

Relación entre los niveles de presión e intensidad acústica

La intensidad y la presión de la energía acústica están relacionadas en un punto de un campo libre mediante la expresión

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho c}, \ \mathrm{W/m^2}$$

Se sustituye en la definición de nivel de intensidad y se obtiene

$$L_I = 10.\log\frac{I}{I_{ref}} = 10.\log\frac{p_{ef}^2}{\rho c I_{ref}} = 10.\log\frac{p_{ef}^2}{p_{ref}^2} + 10.\log\frac{p_{ref}^2}{\rho c I_{ref}} \ \mathrm{dB} \qquad (2.16)$$

$$L_I = L_p + 10 \log K \qquad \mathrm{dB,\ ref\ 2.10^{-5}\ Pa} \qquad (2.17)$$

La cantidad 10.log K será nula si K = 1, esto se cumple cuando

$$\rho c = \frac{p_{ref}^2}{I_{ref}} = \frac{(2.10^{-5})^2}{10^{-12}} = 400 \ \mathrm{N.s/m^3}$$

La resistencia específica del aire es aproximadamente de 410 Rayl a la temperatura de 22ºC y presión de una atmósfera, por lo que en las medidas acústicas en campo libre se pueden considerar aproximadamente iguales L_p y L_I

Relación entre los niveles de intensidad y de potencia acústica.

Se considera que la intensidad acústica es uniforme sobre un área S m^2, entonces la potencia y la intensidad acústicas están relacionadas por W = I.S . Se sustituye en la definición de nivel de potencia

$$L_w = 10.\log\frac{W}{10^{-12}} = 10.\log\frac{I}{10^{-12}} + 10.\log\frac{S}{S_0} \ \mathrm{dB}$$

$$L_W = L_I + 10.\log\frac{S}{S_0} \ dB,\ ref\ 10^{-12} W, \quad S_0 = 1\, m^2 \qquad (2.18)$$

En el caso particular S = 1 m^2, $L_W = L_I$

2.10- ANÁLISIS ESPECTRAL DEL SONIDO. RUIDO BLANCO Y RUIDO ROSA

Generalmente el sonido tiene una estructura compleja, e incluye gran parte de las frecuencias del rango audible. El análisis espectral del sonido consiste en la determinación de su contenido energético en función de la frecuencia. La medida de estos parámetros se realiza mediante analizadores espectrales, los cuales funcionan mediante el uso de filtros electrónicos que actúan sobre los intervalos de frecuencias predeterminados, valorando el contenido energético en ese intervalo. Estos intervalos de frecuencias se denominan bandas de frecuencia y están acotados por una frecuencia inferior y otra superior.

Las bandas normalizadas en acústica son de ancho de banda proporcional. Las más utilizadas son:

BANDAS DE OCTAVA

Una octava se define como una relación 2:1 entre dos frecuencias. Su expresión matemática es $\frac{f_2}{f_1} = 2^n$, donde f_2 es la frecuencia superior del intervalo, f_1 la frecuencia inferior y n el número de octavas.
Cuando n = 1, se tiene la banda de octava, se caracteriza porque su frecuencia superior f_2 es siempre el doble de la inferior.

$$f_2 = 2 f_1 \qquad (2.19)$$

La frecuencia central viene expresada por el valor medio geométrico de los valores extremos.

$$f_c = \sqrt{f_1 . f_2} = f_1 . \sqrt{2} \qquad (2.20)$$

y el ancho de banda es:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \qquad (2.21)$$

Un criterio habitual en acústica está basado en tomar la frecuencia de 1000 Hz como patrón de frecuencias, de esta manera, la expresión del criterio anterior sería $f_2 = 1000.2^n$, $(-6 \leq n \leq 4)$. La extensión de la banda de audiofrecuencias es de 10 octavas. Las frecuencias centrales que dan el nombre a las bandas de octava son:
1000.2^{-6} =15,6 Hz, 1000.2^{-5} = 31,25 Hz, 1000.2^{-4} = 62,5 Hz , 1000.2^{-3} = 125

1000.2^{-2} = 250 Hz, 1000.2^{-1}= 500 Hz, 1000.2^{0} = 1000 Hz, 1000.2^{1} = 2.000 Hz

1000.2^{2} = 4.000 Hz, 1000.2^{3} = 8.000 Hz, 1000.2^{4} = 16.000 Hz

BANDAS DE TERCIO DE OCTAVA

Son los tres intervalos consecutivos en que queda dividida una octava. En la definición de octavas, se sustituye n = 1/3.. Sus frecuencias de corte superior e inferior quedan relacionadas por:

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2}, \qquad f_2 = 1,26\, f_1, \qquad f_c = \sqrt{f_1 . f_2}$$

La medida de un sonido por bandas conduce a los niveles de presión o intensidad acústica ya descritos, pero limitando el valor de la banda correspondiente a dB/octava, dB/1/3, dB/Hz. De la misma forma se utilizan bandas de 1/12 y de 1/24 de octava.

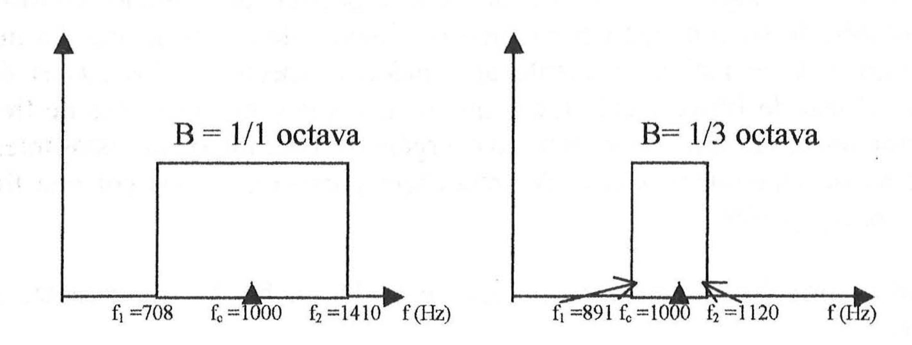


Figura 2.1: Banda de frecuencia central a 1kHz en octavas y tercio de octavas

En la acústica de la edificación las frecuencias centrales preferentes son las siguientes: En bandas de octava: 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz. En tercios de octava: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.000, 2.500, 3.150, 4.000 y 5.000 Hz.

RUIDO BLANCO

Se denomina así a un ruido de espectro continuo, que medido por bandas de Hz, dB/Hz, es constante en todo el rango audible, contiene todas las frecuencias con la misma amplitud. En una representación gráfica del nivel en función de la frecuencia, su representación será una recta paralela al eje de abcisas. Si el nivel de un ruido blanco lo representamos en bandas de un tercio de octava, su gráfica será una recta ascendente con una pendiente de 3dB/octava, pues en cada banda hay el doble de frecuencias que en la anterior.

RUIDO ROSA

Es un ruido de espectro continuo, cuyo nivel por bandas es constante. En una representación gráfica del nivel en función de la frecuencia en dB/Hz, la gráfica es una recta descendente de pendiente 3 dB/octava, pues cada banda tiene la mitad de frecuencias que la siguiente, (10log ½ = -3).Cuando se emite un ruido rosa, el nivel medido en octavas es 5 dB superior al medido en tercios de octava, (10 log 3 = 5).
Los ruidos rosa y blanco se utilizan para efectuar medidas acústicas normalizadas.

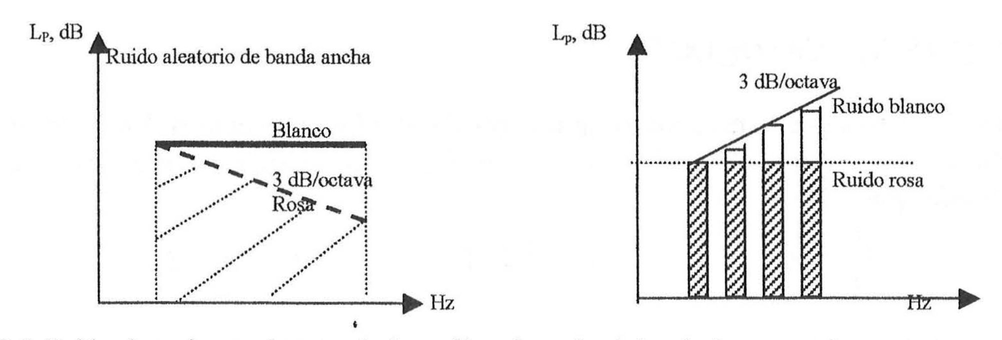


Figura 2.2: Ruido aleatorio pasado a través de un filtro de ancho de banda de porcentaje constante

2.11 -REDES DE PONDERACIÓN

2.11.1. PONDERACIONES DE FRECUENCIA

Con la finalidad de que los instrumentos de medida utilizados en acústica tengan en cuenta la forma en que responde el oído humano ante el sonido, se introducen en ellos unas redes de ponderación en frecuencia, de forma que dependiendo de los tipos de sonidos incidentes sobre el instrumento de medida, este pondere la energía.

A lo largo de los años se han ido utilizando distintas redes de ponderación, pero se ha demostrado que independientemente del nivel sonoro, para la mayoría de los ruidos, tanto la molestia, como la peligrosidad para el órgano de la audición, quedan mejor determinados cuando se emplea en la medición la red de ponderación espectral A, por lo que su uso es el más general. Según la Norma UNE CEN 60651, la ponderación espectral A se utiliza para compensar las diferencias de sensibilidad que el oído humano muestra para las diferentes frecuencias del campo auditivo. Es una aproximación con signo negativo de la curva de nivel de sonoridad igual a 40 fonios.

La red de ponderación C se utiliza en el etiquetado de máquinas, al ser prácticamente plana en todo su espectro.

Para medir el ruido producido por aeronaves se suele utilizar la red de ponderación D, que utiliza criterios de *ruidosidad.*

Al dar los resultados de la medida hay que indicar la red de ponderación que se ha utilizado.

La forma de las curvas de ponderación se muestra en la figura siguiente:

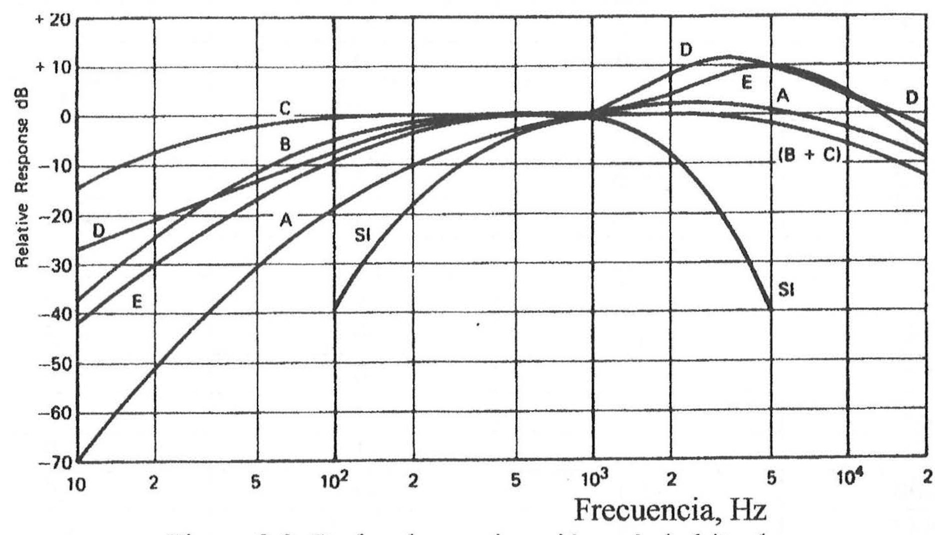


Figura 2.3: Redes de ponderación más habituales

<u>Procedimiento para el cálculo de niveles globales ponderados A</u>

El nivel de presión acústica ponderado A se define mediante la fórmula:

$$L_{pA} = 10\lg(\frac{p_A}{p_0})^2 \quad dB \qquad (2.22)$$

En cada banda de frecuencia se aplica la corrección correspondiente a la red de ponderación A y se componen los resultados obtenidos en todas las bandas. Por ejemplo para obtener el nivel global ponderado A, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$L_{pA} = 10.\log\left(\Sigma\ 10^{0,1\,(Li + Ai)} \right)\ dB\ ,\ ref\ 2.10^{-5}\ Pa \qquad (2.23)$$

donde: L_i es el nivel de presión acústica en la banda i; A_i es la ponderación espectral A en esa banda.

Frecuencia central, Hz	Corrección, dB		
	A	**B**	**C**
25	-44	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
40	-34,6	-14,2	-2,0
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,4	-3,0	-0,1
200	-10,9	-2,0	0
250	-8,6	-1,3	0
315	-6,6	-0,8	0
400	-4,8	-0,5	0
500	-3,2	-0,3	0
630	-1,9	-0,1	0
800	-0,8	0	0
1000	0	0	0
1250	+0,6	0	0
1600	+1,0	0	-0,1
2000	+1,2	-0,1	-0,2
2500	+1,3	-0,2	-0,3
3150	+1,2	-0,4	-0,5
4000	+1,0	-0,7	-0,8
5000	+0,5	-1,2	-1,3
6000	-0,1	-1,9	-2,0
8000	-1,1	-2,9	-3,0
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-6,1	-6,2
16000	-6,6	-8,4	-8,5
20000	-9,3	-11,1	-11,2

TABLA 2.2: Respuestas normalizadas A, B y C de filtros de frecuencias

2.11.2 PONDERACIONES TEMPORALES

La mayoría de los sonidos que se miden en la práctica tienen variaciones temporales. Para una medida adecuada hay que medir estas variaciones con la mayor precisión posible. Las ponderaciones temporales normalizadas más utilizadas se identifican mediante los nombres Rápida, F(Fast), Lenta, S (Slow) e Impulso, I. La ponderación rápida tiene una constante de tiempo de 125 ms , la lenta de 1 s y la de impulso de 35 ms para sonidos que aumentan con el tiempo y de 1,5 s para sonidos que disminuyen con el tiempo. La elección de la ponderación temporal depende de la estabilidad del sonido, de los requisitos de las normas de medición, etc. Se suelen representar:

- L_{AFMax}, L_{ASMax}, L_{AIMax}, son los niveles máximo de ruido ponderado A medidos con ponderación temporal rápida F, lenta, S o impulso, I: Son los niveles sonoros más altos que se producen durante el tiempo de medición.
- L_{AFMin}, L_{ASMin}, L_{AIMin}: son los niveles mínimos de ruido ponderado A medidos con ponderación temporal rápida F, lenta, S o impulso, I: Son los niveles sonoros mínimos que se producen durante el tiempo de medición.

2.12 - ÍNDICES DE VALORACIÓN DEL RUIDO

Dado que el sonido es una forma de energía, el daño auditivo potencial de un ambiente sonoro dado, no depende únicamente de su nivel, sino también de su duración. Para valorar el daño auditivo potencial de un ambiente sonoro, se deben medir y combinar el nivel sonoro y la duración de la exposición, para poder determinar el nivel de energía recibida.

Los ruidos pueden ser continuos, intermitentes, impulsivos, tonales, de baja frecuencia, etc. Para medir el ruido es necesario conocer el tipo de ruido, con ello se pueden elegir los parámetros acústicos a medir, la duración de las mediciones y la instrumentación acústica adecuada.

El carácter variable en el tiempo de la mayoría de los ruidos, obliga a definir unos índices que permitan asignar un valor representativo de la respuesta humana a dicha variación temporal. A continuación se definen algunos de los más habituales.

NIVEL DE PRESIÓN SONORA CONTINUO EQUIVALENTE

Se define como el nivel de presión sonora medido en dB, de un ruido permanente que a lo largo de un intervalo de tiempo determinado, tiene la misma energía que el ruido real de nivel variable que se quiere evaluar, durante el mismo intervalo de tiempo. Matemáticamente se expresa como el nivel eficaz del sonido en el intervalo de medida.

$$L_{eq,T} = 10.\log\frac{1}{T}\int_0^T \frac{p_{ef}^2}{p_0^2}dt \quad \text{dB}, \qquad p_0 = 20\mu\text{Pa} \qquad (2.24)$$

Generalmente se expresa con la ponderación A, y se escribe $L_{Aeq,T}$, donde T es el intervalo de tiempo de medida.

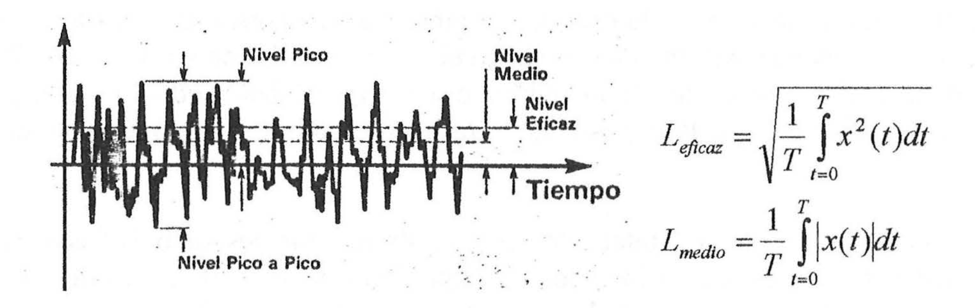
$$L_{Aeq,T} = 10\log\left[\frac{1}{T}\int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2}dt\right] \quad dB, \quad p_0 = 20\mu Pa \qquad (2.25)$$

En la práctica, si no se dispone de un sonómetro que realice la medida directamente, en el caso de N intervalos en los cuales el ruido puede considerarse como constante en cada intervalo temporal, ± 2 dB, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$L_{Aeq,T} = 10.\log\left(\frac{\sum_{i=1}^{N} t_i.10^{0,1L_{pAi}}}{T}\right) \quad dB \quad p_0 = 20\mu Pa \qquad (2.25)$$

en la cual t_i es el tiempo que está presente el nivel L_{pAi} y T es el intervalo de tiempo en el que se quiere calcular el nivel de presión sonora continuo equivalente.

La utilización del $L_{Aeq,T}$ está recomendada cuando el nivel sonoro es fluctuante y se desea conocer el valor medio de la exposición a lo largo de un intervalo de tiempo. Se utiliza para evaluar las molestias por exposición a ruidos, criterios de exposición ocupacional, evaluación de ruidos de tráfico, etc.



NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA.

El nivel de exposición sonora (SEL) de un suceso de ruido discreto, se define como un sonido de nivel constante que actúa durante un segundo y que tiene la misma cantidad de energía sonora que el sonido original en un intervalo de tiempo T. Matemáticamente se expresa:

$$L_{AE} = 10.\log\left(\frac{1}{T_0}\int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2}dt\right) \quad dB, \; p_0 = 20\mu Pa \qquad (2.26)$$

donde: T_0, es el tiempo de referencia de 1 segundo, $p_A(t)$ es la presión sonora instantánea ponderada A, p_0 es la presión de referencia 2.10^{-5} Pa, y T es el intervalo de tiempo establecido que abarca los sonidos significantes de un evento elegido.

L_{AE} está dado por la norma ISO 3891 como L_{AX} (single-event exposure level).

Es un índice útil para calcular los niveles sonoros que resultan de cualquier combinación de fuentes sonoras y está especialmente indicado para la evaluación de sucesos tales como sobrevuelos de aeronaves, paso de trenes, etc.

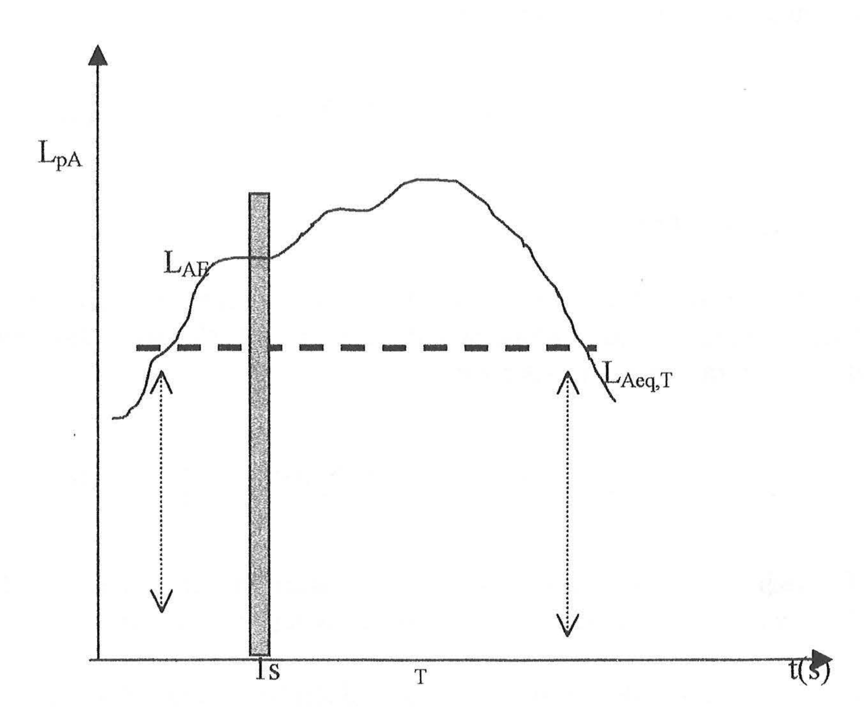
Para un único suceso acústico, el nivel de presión sonora continuo equivalente en un intervalo T, está relacionado con el nivel de exposición sonora, mediante la siguiente expresión:

$$L_{Aeq,T} = L_{AE} - 10.\log\frac{T}{T_0} \tag{2.27}$$

donde todos los intervalos de tiempo están medidos en segundos.

Si una serie de n sucesos acústicos ocurren en un intervalo de tiempo T, el correspondiente nivel sonoro continuo equivalente puede ser calculado del nivel de exposición sonora de cada suceso $L_{AE(i)}$ mediante la expresión:

$$L_{Aeq,T} = 10.\log\left[\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_{AE(i)}}\right] \quad dB \tag{2.28}$$



En la descripción de ruidos comunitarios son habituales los siguientes niveles sonoros continuos equivalentes, aunque pueden variar los intervalos horarios según los países.

NIVEL SONORO DÍA

Es el nivel de presión sonora continuo equivalente medido para horas diurnas, entre las 7 de la mañana y las 23 horas, se escribe $L_{Aeq,\ día}$ o L_d. Puede medirse con un sonómetro integrador o calcularse a partir de los niveles sonoros continuos equivalentes de cada hora, según la expresión:

$$L_d = 10.\log\left\{\left(\frac{1}{16}\right)\left[\sum_{i=7}^{i=23}10^{0,1L_{1h}(i)}\right]\right\} \quad \text{dB} \tag{2.29}$$

los dieciséis niveles sonoros promedio están medidos entre las 7 de la mañana y las 11 de la noche, se mide de 7 a 8, 8 a 9, etc. En el símbolo sumatorio se indica la hora de finalización.

NIVEL SONORO TARDE

En algunos estados de la Unión Europea y de Estados Unidos se utiliza el Nivel Sonoro Tarde, L_e, es el nivel sonoro continuo equivalente medido de siete de la tarde a once de la noche, (19-23 h) o calculado a partir de los niveles sonoros continuos equivalentes de ese intervalo horario, de acuerdo con la expresión:

$$L_e = 10.\log\left\{\left(\frac{1}{4}\right)\left[\sum_{i=19}^{i=23} 10^{0,1L_{1h}(i)}\right]\right\} \quad \text{dB} \qquad (2.30)$$

NIVEL SONORO NOCHE

Es el nivel de presión sonora continuo equivalente medido para horas nocturnas, entre las 23 horas y las 7 de la mañana. Se escribe $L_{Aeq,\ noche}$ o L_n. Puede medirse con un sonómetro integrador o calcularse a partir de los niveles sonoros continuos equivalentes de cada hora, según la expresión:

$$L_n = 10.\log\left\{\left(\frac{1}{8}\right)\left[\sum_{i=23}^{i=7} 10^{0,1L_{1h}(i)}\right]\right\} \quad \text{dB} \qquad (2.31)$$

NIVEL SONORO DE 24 HORAS

Es el nivel de presión sonora continuo equivalente medido para 24 horas, se escribe $L_{Aeq,24h}$ o L_{24h}. Puede calcularse a partir de los niveles sonoros continuos equivalentes de cada hora, según la expresión:

$$L_{Aeq,24h} = 10.\log\left\{\left(\frac{1}{24}\right)\left[\sum_{i=1}^{i=24} 10^{0,1L_{1h}(i)}\right]\right\} \quad \text{dB} \qquad (2.32)$$

También puede calcularse a partir del nivel sonoro día, L_d, calculado sobre 16 horas (7 a 23 h) y el nivel sonoro noche, L_n , sobre las restantes 8 horas.

El nivel sonoro de 24 horas puede relacionarse con el nivel de exposición sonora. Cuando T = 24 h = 86400 s, el nivel sonoro promedio de las 24 horas es:

$$L_{Aeq,24h} = 10.\log\left[\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1L_{AE}(i)}\right] - 49,4 \quad \text{dB} \qquad (2.33)$$

NIVEL SONORO CORREGIDO DÍA-NOCHE

Es el nivel de presión sonora continuo equivalente durante 24 horas, que incluye un incremento de 10 dB al nivel nocturno, comprendido entre las 23 h y las 7 horas. Fue propuesto en USA en 1974. La penalización del ruido nocturno en 10 dB está probablemente basada en el sentido común, más que en datos experimentales. Este descriptor, ha sido aceptado ampliamente en los países occidentales, incluyendo al ruido aéreo y al de tráfico.

El nivel sonoro corregido día-noche L_{dn} , en dB, puede ser calculado del conjunto de los 24 niveles sonoros correspondientes a cada hora, mediante la expresión:

$$L_{dn} = 10.\log\left\{\frac{1}{24}\left[\sum_{i=23}^{i=7} 10^{0,1(L_{1h(i)}+10)} + \sum_{i=8}^{i=23} 10^{0,1L_{1h(i)}}\right]\right\} \quad dB \qquad (2.34)$$

Otra forma alternativa más simplificada del nivel sonoro promedio día-noche, puede ser calculada de los niveles sonoros correspondientes a los períodos de día y al de noche corregido.

$$L_{dn} = 10.\log\left[(\frac{16}{24})10^{0,1L_d} + (\frac{8}{24})10^{0,1(L_n+10)}\right] \quad \text{dB} \qquad (2.35)$$

El nivel sonoro promedio día-noche para m niveles de exposición sonora durante la noche y de n niveles de exposición sonora durante el día, se obtiene mediante la expresión:

$$L_{dn} = 10.\log\left\{\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1L_{AE(i)}} + \sum_{j=1}^{m} 10^{0,1\left[L_{AE(j)}+10\right]}\right\} - 49,4 \quad \text{dB} \qquad (2.36)$$

NIVEL EQUIVALENTE DE RUIDO COMUNITARIO

El nivel equivalente de ruido comunitario, o nivel sonoro día-tarde-noche, L_{den} se utiliza en algunos estados para regular el ruido en las comunidades. Es el nivel sonoro continuo equivalente ponderado A para 24 horas, obtenido después de añadir 5 dB a los niveles sonoros comprendidos entre las 19 y 23 horas, y 10 dB a los niveles sonoros entre las 23 y 7 horas. Se puede calcular mediante los niveles sonoros horarios, sustituyendo en la expresión:

$$L_{den} = 10.\log\left[(\frac{12}{24})10^{0,1L_d} + (\frac{4}{24})10^{0,1(L_d+5)} + (\frac{8}{24})10^{0,1(L_n+10)}\right] \quad \text{dB} \qquad (2.37)$$

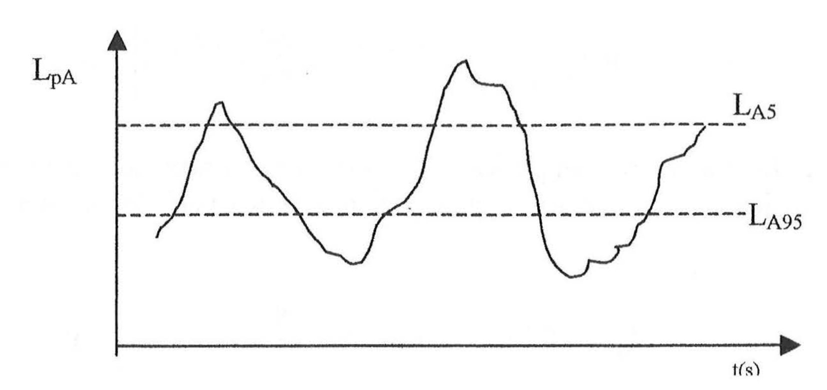
NIVELES PERCENTILES.

Las fluctuaciones de los niveles sonoros del ruido en el transcurso del tiempo tienen una influencia considerable en las molestias y en el riesgo que puede producir a las personas expuestas, por ello se estudia su variación temporal en el ruido de tráfico rodado, ferrocarriles, aeronaves y en el ruido ocupacional.

Los índices más utilizados en los análisis estadísticos son los niveles percentiles, $L_{AN,T}$, su fundamento es suponer que los ruidos siguen una distribución gaussiana. Son descriptores estadísticos que se utilizan para complementar la información aportada por el $L_{Aeq,T}$ cuando el ruido presenta una evolución aleatoria.. *Los índices $L_{AN,T}$ indican los niveles de presión sonora ponderado A, que han sido alcanzados o sobrepasados el N% del tiempo de medición considerado.* Los más utilizados son: L_{A1}, L_{A5}, L_{A50}, L_{A95} y L_{A99}. Al realizarse las mediciones se debe indicar la ponderación temporal, generalmente la rápida, F, por ello se suelen escribir $L_{AFN,T}$.

L_{A1} y L_{A5} son los niveles máximos, L_{A95} y L_{A99} son los niveles de fondo.

Se denomina Clima Sonoro a la diferencia L_{A10} - L_{A90}.



Para ruido de tráfico rodado circulando libremente con un caudal circulatorio superior a 100 veh/h, una relación empírica aproximada es: $L_{A10} = L_{Aeq} + 3$ dB

2.13.- INDICADORES DE RUIDO PROPUESTOS EN LA DIRECTIVA 2002/49/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO DE 25 DE JUNIO DE 2002 SOBRE EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL RUIDO AMBIENTAL.

La Directiva tiene por objeto establecer un enfoque común destinado a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos nocivos, incluyendo las molestias de la exposición al ruido ambiental.

Según la Directiva *Ruido ambiental*, es el sonido no deseado o nocivo generado por la actividad humana en el exterior, incluido el ruido emitido por medios de transporte, emplazamientos industriales o edificios industriales.

Esta Directiva se aplicará al ruido ambiental al que estén expuestos los seres humanos en particular en zonas urbanizadas, en parques públicos u otras zonas tranquilas en una aglomeración, en zonas tranquilas en campo abierto, en las proximidades de centros escolares y en los alrededores de hospitales, y en otros edificios y lugares vulnerables al ruido.

Un *Indicador de ruido*, es una magnitud física para describir el ruido ambiental, que tiene una relación comprobada con un efecto nocivo. Como indicadores de ruido en la Directiva se proponen:

Nivel día-tarde-noche L_{den}.

El nivel día tarde noche L_{den} en decibelios (dB) se determina aplicando la siguiente fórmula:

$$L_{den} = 10\log\frac{1}{24}(12.10^{0,1L_{day}} + 4.10^{0,1(L_{evening}+5)} + 8.10^{0,1(L_{night}+10)}) \quad dB$$

donde

L_{day} es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los períodos diurnos de un año.

$L_{evening}$ es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los períodos vespertinos de un año.

L_{night} es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los períodos nocturnos de un año.

Donde al día le corresponden 12 horas, a la tarde, 4 horas y a la noche, 8 horas. Los Estados miembros pueden optar por reducir el período vespertino en una o dos horas y alargar los períodos diurno y/o nocturno en consecuencia, siempre que dicha decisión se aplique a todas las fuentes. Por defecto los intervalos horarios son : día (7.00 –19.00), tarde (19.00 –23.00) y noche (23.00 – 7.00)), en la hora local.

La altura del punto de evaluación de L_{den} depende de la aplicación. Para la confección de mapas de ruido estratégicos en relación con la exposición al ruido en el interior y en las proximidades de edificios, los puntos de evaluación se sitúan a 4,0 ± 0,2 m (3,8 – 4,2 m) de altura sobre el nivel del suelo en la fachada más expuesta. La fachada más expuesta será el muro exterior más próximo frente a la fuente sonora; en los demás casos, podrán decidirse otras opciones.

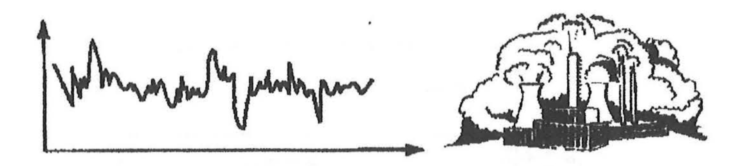
Indicador de ruido en período nocturno

El indicador de ruido en período nocturno L_{night} es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los períodos nocturnos de un año. Donde la noche dura 8 horas.

2.14 TIPOS DE RUIDO. EJEMPLOS

En la medida del ruido y en la busqueda de soluciones para protegernos contra el, es necesario conocer de que tipo es, sus características, etc. Esto nos permite elegir los parámetros acústicos que tenemos que medir, duración de la medición, equipos, materiales o dispositivos más adecuados, etc. A continuación se representan algunos de ellos.

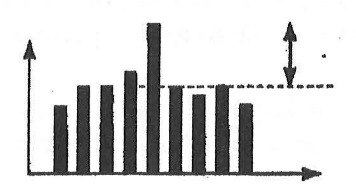
1 Ruido continuo



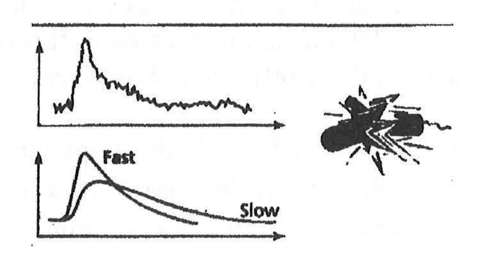
2 Ruido intermitente



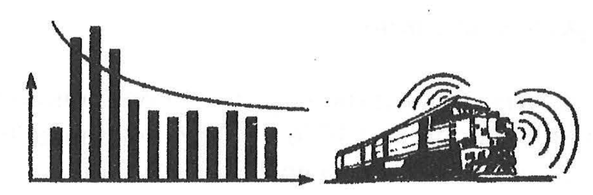
3 Ruido tonal



4 Ruido impulsivo



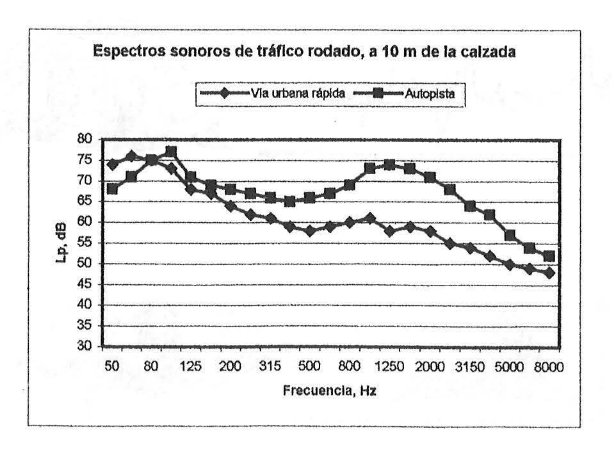
5 Ruidos de bajas frecuencias



Son molestos y difíciles de amortiguar. Se oyen a gran distancia. Es típico de grandes motores Diesel en trenes, barcos, centrales de energía, etc.

6 Ruido de tráfico rodado



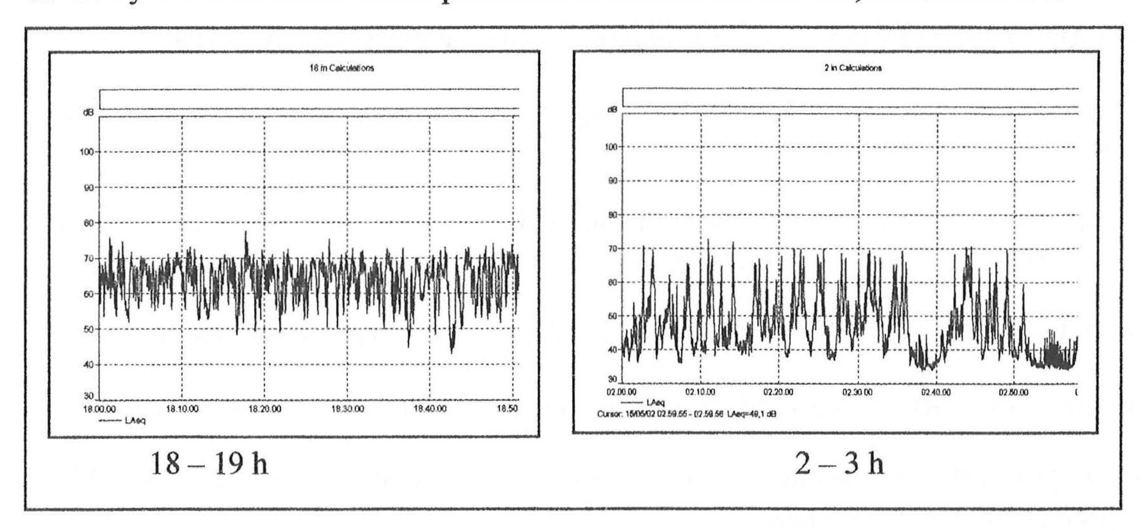


EJEMPLOS DE NIVELES SONOROS EN ALGUNAS CALLES DE MADRID EN INTERVALO HORARIO DIURNO

Calle	$L_{Aeq,día}$ dB	LAFMax dB	LAFMin dB	L_{AF1} dB	L_{AF5} dB	L_{AF10} dB	L_{AF50} dB	L_{AF90} dB	L_{AF95} dB	L_{AF99} dB
Princesa	68,7	80,8	61,5	75,7	72,5	71,1	67,6	63,3	62,9	62,3
Altamirano	62,1	77,1	53,7	71,2	67,5	65,2	59,1	56,2	55,7	55,0

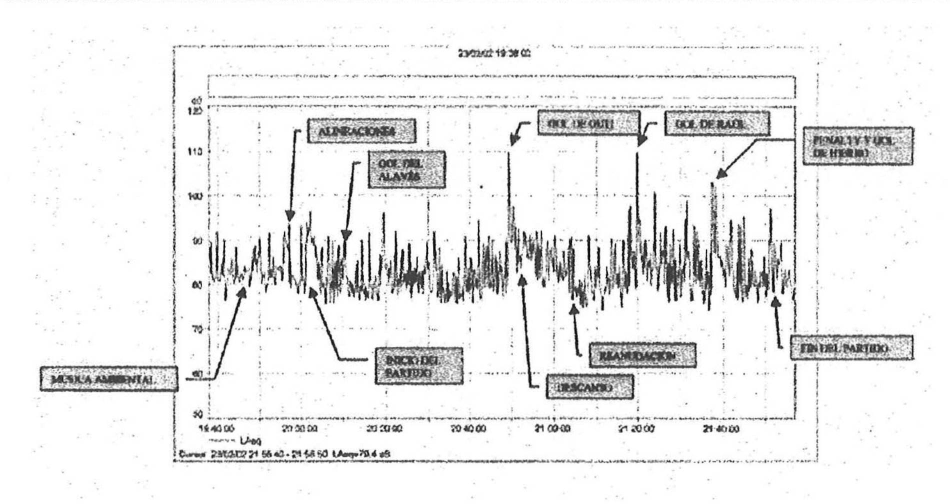
EJEMPLO DE RUIDO DE TRÁFICO EN UNA CARRETERA

Carretera M-607 a su paso por CERCEDA. Medición realizada a 30 m del centro de la calzada y a 4 m de altura. Aforo promedio de tráfico: día 600 v/h, noche: 200 v/ h



Hora de inicio	Tiempo total	LAeq dB	LAFMax dB	LAFMin dB	LA1 dB	LA5 dB	LA10 dB	LA50 dB	LA90 dB	LA95 dB	LA99 dB
14/5/02 **18.00**	1.00.00	66,2	79,8	42,4	72,9	70,7	69,6	64,8	54,6	52	46,8

Hora de inicio	Tiempo total	LAeq dB	LAFMax dB	LAFMin dB	LA1 dB	LA5 dB	LA10 dB	LA50 dB	LA90 dB	LA95 dB	LA99 dB
15/5/02 **2.00**	1.00.00	56	73,6	32,8	68,2	63,7	59,6	44,5	36	35,2	34,2



$L_{Aeq,\ partido} = 89{,}3$ dB,

Figura: Evolución de los niveles sonoros en un partido de futbol (R. Madrid – Alavés), 23-2-2.002

BIBLIOGRAFÍA

[1] BERANEK, L., Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.

[2] CREMER;MÜLLER. Principles and Applications of Room Acoustics. Vol. I, II, Applied Science Publishers. London, 1982.

[3] CREMER; HECKL, UNGAR. Structure Borne Sound. Springer Verlag, Berlín, 1988

[4] FAHY,F. Sound and Structural Vibration, Academic Press, London, 1994

[5] FAHY, F., Foundations of Engineering Acoustics. Academic Press, San Diego, 2001.

[6] HARRIS, C., Acoustical Measurements and Noise Control, Mc Graw Hill, New York, 1991. Existe una versión en español.

[7] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, Diversas Normas ISO

[8] KINSLER; FREY; COPPENS. Fundamentos de Acústica, Limusa, Mexico, 1988.

[9] KUTTRUFF, H. Room Acoustics, Elsevier Applied Science, London, 1991. Reprinted 1999 by Spon Press.

[10] LARA, STHEPENS,. Noise Pollution, John Wiley &Sons, London, 1986.

[11] MORSE, P.M., INGARD K. U., Theoretical Acoustics. Princeton University Press, Princenton, New Jersey, 1968.

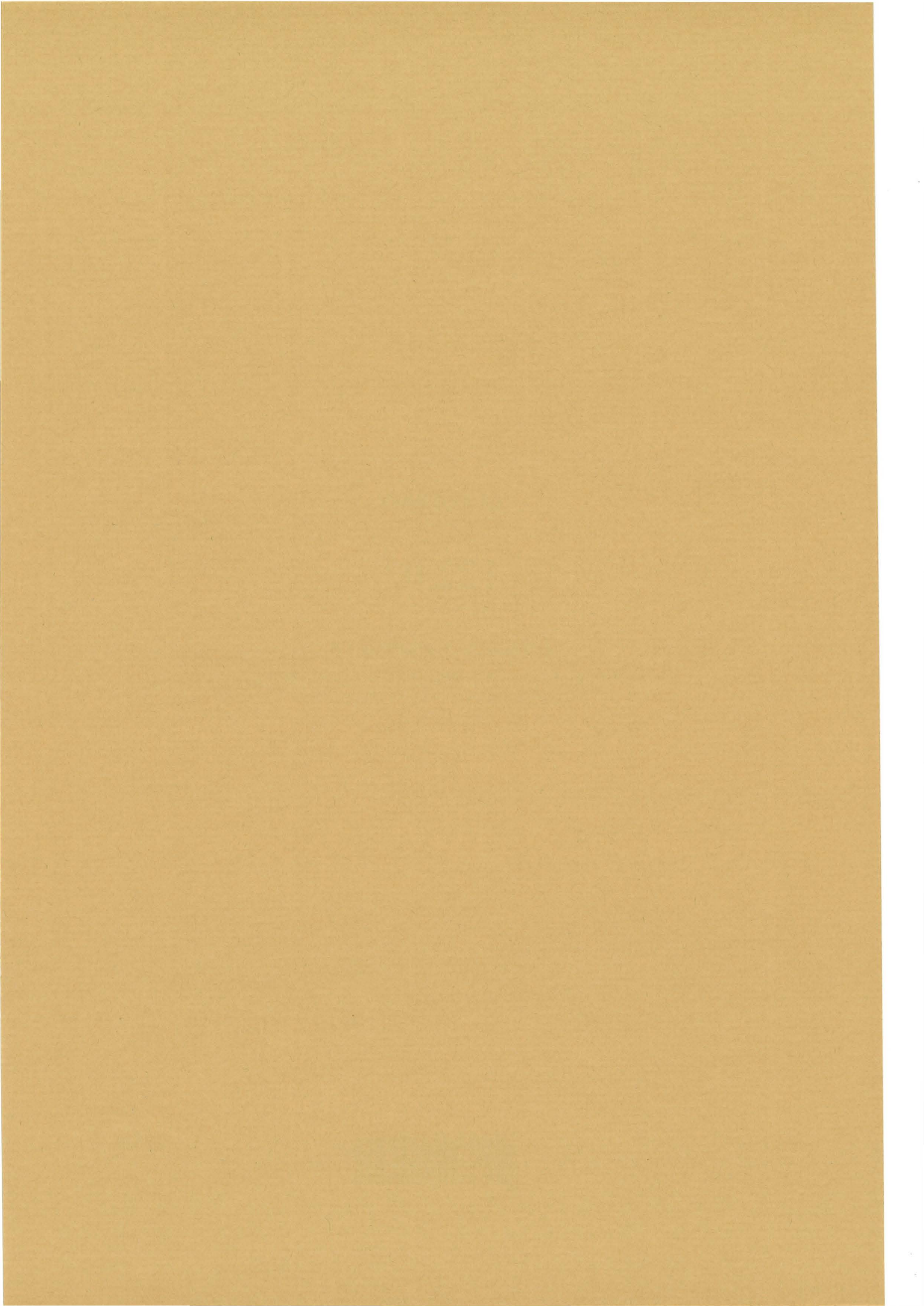
[12] NELSON,P. Transportation Noise. Reference Book. Butterworths, London, 1987.

[13] PIERCE D., Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, McGraw-Hill, New York. 1981.

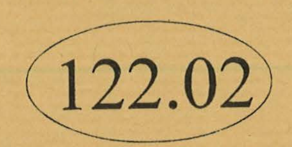
[14] ROSSING, FLETCHER, Principles of Vibration and Sound, Springer-Verlag, New York, 1995.

NOTAS

NOTAS



CUADERNO



CATÁLOGO Y PEDIDOS EN
http://www.aq.upm.es/of/jherrera
info@mairea-libros.com

